



Modélisation agile pour un système de fabrication complexe et dynamique

Ahmed Ben Amira

► To cite this version:

Ahmed Ben Amira. Modélisation agile pour un système de fabrication complexe et dynamique. Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2015. Français. NNT : 2015EMSE0793 . tel-01369238

HAL Id: tel-01369238

<https://theses.hal.science/tel-01369238>

Submitted on 20 Sep 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



NNT : 2015 EMSE 0793

THÈSE

présentée par

Ahmed BEN AMIRA

pour obtenir le grade de

Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

Spécialité : **Génie Industriel**

MODÉLISATION AGILE POUR UN SYSTEME DE FABRICATION COMPLEXE ET DYNAMIQUE

soutenue à Gardanne, le 14 octobre 2015

Membres du jury

Président :	Valérie BOTTA-GENOULAZ	Professeur, INSA Lyon, Lyon
Rapporteurs :	Bruno VALLESPER	Professeur, Université Bordeaux, Talence
	Michel TOLLENAERE	Professeur, Grenoble - INP, Grenoble
Examineurs :	Xavier BOUCHER	Professeur, EMSE, Saint-Etienne
Directeur de thèse :	Stéphane DAUZÈRE-PÉRÈS	Professeur, EMSE, Gardanne
Responsable industriel :	Guillaume LEPELLETIER	Ingénieur, STMicroelectronics, Crolles
Responsable industriel :	Philippe VIALLETTELLE	Ingénieur, STMicroelectronics, Crolles
Co-encadrant :	Philippe LALEVÉE	Directeur CMP, EMSE, Gardanne

Specialités doctorales	Responsables :		Specialités doctorales	Responsables
SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX	K. Wolski Directeur de recherche		MATHEMATIQUES APPLIQUEES	O. Roustant, Maître-assistant
MECANIQUE ET INGENIERIE	S. Drapier, professeur		INFORMATIQUE	O. Boissier, Professeur
GENIE DES PROCÉDÉS	F. Guvy, Maître de recherche		IMAGE, VISION, SIGNAL	J.C. Pinoli, Professeur
SCIENCES DE LA TERRE	B. Guy, Directeur de recherche		GENIE INDUSTRIEL	A. Dolgui, Professeur
SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT	D. Gralliot, Directeur de recherche		MICROÉLECTRONIQUE	S. Dauzere Peres, Professeur
EMSE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)				
ABST	Nabil	CR	Génie industriel	CMP
AVRIL	Stéphane	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
BALBO	Flavien	PR2	Informatique	FAYOL
BASSEREAU	Jean-François	PR	Sciences et génie des matériaux	SMS
BATTALA-GUSCHINSKAYA	Olga	CR		FAYOL
BATTON-HUBERT	Mireille	PR2	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
BERGER DOUCE	Sandrine	PR2	Sciences de gestion	FAYOL
BIGOT	Jean Pierre	MR(DR2)	Génie des Procédés	SPIN
BILAL	Essaid	DR	Sciences de la Terre	SPIN
BLAYAC	Sylvain	MA(MDC)	Microélectronique	CMP
BOISSIER	Olivier	PR1	Informatique	FAYOL
BONNEFOY	Olivier	MA(MDC)	Génie des Procédés	SPIN
BORBELY	Andras	MR(DR2)	Sciences et génie des matériaux	SMS
BOUCHER	Xavier	PR2	Génie Industriel	FAYOL
BRODHAG	Christian	DR	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
BRUCHON	Julien	MA(MDC)	Mécanique et ingénierie	SMS
BURLAT	Patrick	PR1	Génie Industriel	FAYOL
COURNIL	Michel	PR0	Génie des Procédés	DIR
DARRIEULAT	Michel	IGM	Sciences et génie des matériaux	SMS
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR1	Génie Industriel	CMP
DEBAYLE	Johan	CR	Image Vision Signal	CIS
DELAFOSSÉ	David	PR0	Sciences et génie des matériaux	SMS
DELORME	Xavier	MA(MDC)		FAYOL
DESRAYAUD	Christophe	PR1	Mécanique et ingénierie	SMS
DOLGUI	Alexandre	PR0	Génie Industriel	FAYOL
DRAPIER	Sylvain	PR1	Mécanique et ingénierie	SMS
FAVERGEON	Loïc	CR	Génie des Procédés	SPIN
FEILLET	Dominique	PR1	Génie Industriel	CMP
FRACZKIEWICZ	Anna	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
GARCIA	Daniel	MR(DR2)	Génie des Procédés	SPIN
GAVET	Yann	MA(MDC)	Image Vision Signal	CIS
GERINGER	Jean	MA(MDC)	Sciences et génie des matériaux	CIS
GOEURLOT	Dominique	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
GRAILLOT	Dider	DR	Sciences et génie de l'environnement	SPIN
GROSSEAU	Philippe	DR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	PR1	Génie des Procédés	SPIN
GUY	Bernard	DR	Sciences de la Terre	SPIN
HAN	Woo-Suck	MR	Mécanique et ingénierie	SMS
HERRI	Jean Michel	PR1	Génie des Procédés	SPIN
KERMOUCHE	Guillaume	PR2	Mécanique et Ingénierie	SMS
KLOCKER	Helmur	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
LAFOREST	Valérie	MR(DR2)	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
LERICHE	Rodolphe	CR	Mécanique et ingénierie	FAYOL
LI	Jean-Michel		Microélectronique	CMP
MALLIARAS	Georges	PR1	Microélectronique	CMP
MAURINE	Philippe	Ingénieur de recherche		CMP
MOLIMARD	Jérôme	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
MONTHAILLET	Frank	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
MOUTTE	Jacques	CR	Génie des Procédés	SPIN
NEUBERT	Gilles	PR		FAYOL
NIKOLOVSKI	Jean-Pierre	Ingénieur de recherche		CMP
NORTIER	Patrice	PR1		SPIN
OWENS	Romain	MA(MDC)		CMP
PICARD	Gauthier	MA(MDC)		FAYOL
PIOLAT	Christophe	PR0	Génie des Procédés	SPIN
PIOLAT	Michèle	PR1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Jean Charles	PR0	Image Vision Signal	CIS
POURCHEZ	Jérémy	MR	Génie des Procédés	CIS
ROBESON	Bruno	Ingénieur de recherche		CMP
ROUSSY	Agnès	MA(MDC)	Génie industriel	CMP
ROUSTANT	Olivier	MA(MDC)	Mathématiques appliquées	FAYOL
ROUX	Christian	PR	Image Vision Signal	CIS
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences et génie des matériaux	SMS
TRIA	Assia	Ingénieur de recherche	Microélectronique	CMP
VALDIVIESO	François	PR2	Sciences et génie des matériaux	SMS
VIRICELLE	Jean Paul	DR	Génie des Procédés	SPIN
WOLSKI	Krzysztof	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
XIE	Xiaolan	PR1	Génie industriel	CIS
YUGMA	Gallian	CR	Génie industriel	CMP
ENISE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)				
BERGHEAU	Jean-Michel	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
BERTRAND	Philippe	MCF	Génie des procédés	ENISE
DUBUIET	Philippe	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
FEULVARCH	Eric	MCF	Mécanique et Ingénierie	ENISE
FORTUNIER	Roland	PR	Sciences et Génie des matériaux	ENISE
GUSSAROV	Andrey	Enseignant contractuel	Génie des procédés	ENISE
HAMDI	Hédi	MCF	Mécanique et Ingénierie	ENISE
LYONNET	Patrick	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
RECH	Joël	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
SMUROV	Igor	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
TOSCANO	Rosario	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
ZAHOUANI	Hassan	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE

Remerciements

Je souhaite remercier, en premier lieu, Messieurs Bruno VALLESPER et Michel TOLLENAERE pour m'avoir fait l'honneur de rapporter mon mémoire de thèse et pour leur retour positif sur mon travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude, particulièrement, Monsieur TOLLENAERE dont l'enseignement et ses qualités humaines m'étaient d'un grand soutien et à qui je suis grandement reconnaissant. Je remercie, aussi, Monsieur Xavier BOUCHER d'avoir accepté d'examiner mon travail de thèse et de faire partie du jury, également Madame Valérie BOTTA-GENOULAZ, qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

Je remercie chaleureusement Monsieur Stéphane DAUZÈRE-PÉRÈS d'avoir rigoureusement dirigé ma thèse tout au long de ces années et de m'avoir fourni une aide précieuse quant à la valorisation académique des résultats industriels. J'associe à ce remerciement Monsieur Philippe VIALLETTELLE pour m'avoir encouragé et pour m'avoir fourni des pistes de recherche qui étaient toujours pertinentes à suivre. Je suis redevable aussi pour la contribution de Monsieur Guillaume LEPELLETIER et pour son grande implication au quotidien, et sans qui les différentes pistes explorées dans ces travaux n'auraient jamais été menées à bout. Je remercie également Monsieur Claude YUGMA et Monsieur Philippe LALEVÉE pour leurs encouragements, leur grande qualité d'écoute et leurs conseils avisés.

Je tiens à remercier tout le service MFA (Move to Full Automation) de STMicroelectronics qui m'ont chaleureusement accueilli et pour leur implication, en particulier Renaud ROUSSEL, Soidri Bastoini et Bruno Sapin. Également, ce travail n'aurait pas été possible sans la collaboration de l'équipe *reporting* du service IT : je tiens à les remercier, en particulier Rémi, Guillaume, Corine et Thomas. De même, je tiens à remercier les différentes personnes avec qui j'avais échangé, m'ayant conseillé, et m'ayant permis de la sorte à mener à bien ce travail.

Les mots me manquent pour remercier, à sa juste valeur Stéphane HUBAC. Depuis que j'ai fait sa connaissance à GI et je n'ai cessé d'apprécier l'expert et surtout l'Homme ! Mes remerciements vont également à toutes les personnes exceptionnelles que j'avais rencontrées à Crolles notamment Luc, Sébastien et Sabrina.

Je remercie également les membres du département SFL (Sciences de la Fabrication et Logistique) et le personnel administratif, particulièrement Michelle GILLET.

Mes remerciements les plus sincères s'adressent aussi aux « amis d'endurance » qui m'ont encouragé pour parvenir à la fin de cette thèse : Florian, Ismaïl, Nabil, Benoît, Carole et Amélie.

Je ne saurais terminer sans exprimer toute ma profonde gratitude envers les êtres les plus chers au monde, mes parents et ma sœur Amel, qui ont toujours été ma source de motivation. Et sans oublier mon frère Baweb qui m'a été d'un très grand soutien moral.

Plan

Plan.....	1
Liste des tableaux.....	4
Liste des figures.....	5
Introduction générale.....	7
1. Introduction et démarche de réflexion.....	7
2. Structure du manuscrit de thèse.....	8
Chapitre 1.....	10
Contexte industriel et scientifique.....	10
1.1 L'industrie des semi-conducteurs.....	11
1.1.1 Les développements technologiques.....	11
1.1.2 Les développements économiques.....	14
1.2 Fabrication des semi-conducteurs.....	16
1.3 Enjeux et caractéristiques des systèmes d'information en fabrication des semi-conducteurs.....	18
1.4 Enjeux scientifiques.....	23
1.5 Conclusion.....	24
Chapitre 2.....	25
État de l'art.....	25
2.1 Introduction.....	26
2.2 Les systèmes d'information.....	26
2.2.1 Qu'est-ce qu'un système d'information ?.....	26
2.2.2 Adaptabilité du système d'information.....	28
2.3 L'alignement Métier / IT.....	29
2.3.1 Le concept d'alignement.....	29
2.3.2 Description du <i>Strategic Alignment Model</i> (SAM).....	31
2.3.3 Flexibilité, agilité et alignement.....	33
2.3.4 Les démarches d'alignement et leurs limites.....	35
2.4 L'Architecture d'Entreprise.....	40
2.4.1 Généralités sur l'architecture d'entreprise.....	40
2.4.2 Lien Architecture d'entreprise – Alignement – Agilité.....	42
2.4.3 Les différents cadres de modélisation d'entreprise.....	43

2.4.4	Limitations et dilemme de l'Architecture d'Entreprise	45
2.5	Autres concepts relatifs à l'ingénierie de l'alignement	46
2.5.1	L'ingénierie des Exigences	46
2.5.2	Potentiel des ontologies	47
2.5.3	Les objets frontières	48
2.5.4	Méthodes de développement agile en informatique	48
2.6	Conclusion	48
Chapitre 3	50
Méthodologie pour l'alignement des systèmes d'information en fabrication de semi-conducteurs	50
3.1	Objectifs.....	51
3.2	Méthodologie par le Modèle de Référence	52
3.4	Construction du Modèle de Référence	60
3.4.1	Organisation pour la construction du Modèle de Référence.....	60
3.4.2	Méthodologie de construction du Modèle de Référence	61
3.5	Conclusion	64
Chapitre 4	65
Mise en œuvre de la méthodologie proposée : étude de la <i>processabilité</i>	65
4.1	La <i>processabilité</i> , définition et enjeux.....	66
4.2	Les éléments « classiques » de la <i>processabilité</i>	66
4.2.1	La qualification	67
4.2.2	La disponibilité des ressources.....	68
4.2.3	Les lots à réaliser	70
4.2.4	Les dérives <i>process</i>	71
4.2.5	Conclusion	72
4.3	Historique de l'évolution de la <i>processabilité</i> pour l'unité de fabrication Colles300 de STMicroelectronics	73
4.3.1	Situation initiale et émergence des <i>fab constraints</i>	73
4.3.2	Avantages et inconvénients des <i>fab constraints</i>	76
4.4	Mise en œuvre de la méthodologie par le Modèle de Référence	78
4.4.1	Définition des scénarios et des concepts fonctionnels	79
4.4.2	Remise à plat des éléments existants du MES	84
4.4.3	Modélisation de la qualification	88

4.4.4	Modélisation des restrictions des procédés.....	89
4.4.5	Modélisation des critères de qualité.....	93
4.4.6	Modélisation de l'appairage.....	95
4.4.7	Modélisation des campagnes.....	97
4.5	Apports de la méthodologie.....	98
4.6	Conclusion	100
Chapitre 5		102
Retour d'expérience sur la mise en œuvre industrielle		102
5.1	Conduite du projet	103
5.1.1	L'étude de terrain.....	104
5.1.2	Évolutions du Modèle de Référence pour la <i>processabilité</i>	106
5.1.3	Générer l'adhésion des acteurs : le volet humain de la méthode	109
5.2	Les bonnes pratiques pour la mise en œuvre industrielle de la méthodologie	111
5.3	Autre application industrielle de la Méthodologie par le Modèle de Référence : le contrôle des procédés.....	113
5.4	Conclusion	114
Conclusion générale et perspectives.....		116
Bibliographie.....		120

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : <i>Synthèse des scénarios et correspondance avec les Concepts Fonctionnels (CF)</i>	63
Tableau 4.1 : <i>Exemple de fab constraints</i>	75
Tableau 4.2 : <i>Illustration de la redondance des fab constraints</i>	78
Tableau 4.3 : <i>Exemples de scenarios de processabilité</i>	82
Tableau 4.4 : <i>Exemple de scenario avec ses possibles concepts fonctionnels</i>	82
Tableau 4.5 : <i>Clarification des concepts fonctionnels en affinant le scénario</i>	83
Tableau 4.6 : <i>Exemple de fab constraints traitant de la qualification</i>	88
Tableau 4.7 : <i>Exemple de fab constraints pour la complexité des combinaisons de leviers</i>	90
Tableau 4.8 : <i>Exemple de fab constraints traitant des critères de qualité</i>	93
Tableau 4.9 : <i>Exemple de fab constraints traitant de l'appairage</i>	95
Tableau 4.10 : <i>Classification d'usage des fab constraints</i>	98
Tableau 4.11 : <i>Validation du modèle de gestion des restrictions des procédés</i>	99
Tableau 5.1 : <i>Exemple de différents usages de la capacité</i>	104

Liste des figures

Figure 1.1 : Liens entre les lois More Moore, More than Moore et Beyond CMOS (ITRS, 2011).....	13
Figure 1.2 : Evolution des modèles économiques dans l'industrie des semi-conducteurs (Bozotti & Bühner , 2005).....	14
Figure 1.3 : Réduction du nombre des fabricants de semi-conducteurs en fonction des nœuds technologiques	16
Figure 1.4 : Schéma de production de dispositifs électroniques en zone Front-End (Mönch, et al., 2011). 17	
Figure 1.5 : Nombre de masques nécessaires pour la réalisation des étapes critiques de 4 générations technologiques CMOS.....	20
Figure 1.6 : Les limites de la résolution en Lithographie	21
Figure 1.7 : Exemple de boucles de régulation FF (Feed Forward) et FB (Feed Backward) en Lithographie	22
Figure 2.1 : Modèle d'Alignement Stratégique de (Henderson & Venkatraman, 1993)	31
Figure 2.2 : Structures internes du Modèle d'Alignement Stratégique de (Henderson & Venkatraman, 1993).....	31
Figure 2.3 : Séquence d'alignement « Exécution de la stratégie d'entreprise ».....	33
Figure 2.4 : Lien entre la flexibilité et l'agilité (Martensson, 2007)	34
Figure 2.5 : Coûts de la flexibilité et de l'agilité en fonction du degré de réactivité et de la nature des actions	35
Figure 2.6 : Positionnement de nos travaux de recherches	38
Figure 3.1 : Illustration de la dérive des solutions réalisées face aux besoins des utilisateurs.....	51
Figure 3.2 : Mise à jour du SAM avec l'introduction du Modèle de Référence comme zone tampon.....	53
Figure 3.3 : Dissociation de la vue Métier de la vue IT par le Modèle de Référence	54
Figure 3.4 : Evolution incrémentale du Modèle de Référence	54
Figure 3.5 : Positionnement des développements IT par rapport au modèle de référence.....	55
Figure 3.6 : Mise à jour des besoins métiers par le modèle de référence.....	56
Figure 3.7 : Synchronisation des vus Métier / IT.....	57
Figure 3.8 : Méthodologie d'alignement par le Modèle de Référence	59
Figure 4.1 : Schématisation de la qualification	68
Figure 4.2 : Schématisation de la disponibilité des ressources.....	70
Figure 4.3 : Modèle de données pour la gestion de la compatibilité Lot / état équipement	71
Figure 4.4 : Schématisation des dérives process	72
Figure 4.5 : Ontologie des éléments classiques de la processabilité	73
Figure 4.6 : Schéma de définition et de mise en place des fab constraints	75
Figure 4.7 : Mise à jour de l'ontologie de la processabilité avec la mise en place des fab constraints.....	76
Figure 4.8 : Nouveau schéma de définition et de mise en place des fab constraints avec le modèle de référence.....	80
Figure 4.9 : Préparation de l'étude de la processabilité	81
Figure 4.10 : Remise à plat de la route	85

Figure 4.11 : <i>Modèle des produits</i>	86
Figure 4.12 : <i>Modèle des procédés</i>	87
Figure 4.13 : <i>Nouveau modèle de la qualification</i>	89
Figure 4.14 : <i>Nouveau modèle de la gestion des restrictions</i>	92
Figure 4.15 : <i>Modèle des critères de qualité</i>	94
Figure 4.16 : <i>Modèle des appairages</i>	96
Figure 4.17 : <i>Modèle des campagnes</i>	98
Figure 5.1 : <i>Situation initiale de la processabilité avec les fab constraints</i>	103
Figure 5.2 : <i>Une des premières itérations du modèle pour représenter la capacité</i>	107
Figure 5.3 : <i>Première modélisation pour l'appairage</i>	108
Figure 5.4 : <i>Apport fédérateur du Modèle de Référence</i>	110
Figure 6.1 : <i>Proposition pour la définition de la stratégie IT</i>	118

Introduction générale

1. Introduction et démarche de réflexion

Les composants issus de l'industrie des semi-conducteurs sont présents aujourd'hui dans toutes les facettes de notre vie quotidienne : les ordinateurs, les téléphones portables, les télévisions, les voitures, etc. Ce succès est principalement dû à deux facteurs :

1. La capacité de l'industrie des semi-conducteurs à produire et à proposer continuellement des innovations technologiques importantes,
2. La réduction des coûts de production tout en augmentant la valeur ajoutée des produits autant au niveau des fonctionnalités qu'au niveau de la performance.

L'exigence des marchés à disposer de plus en plus rapidement de produits innovants, performants, et à faible coût a davantage accentué la forte concurrence dans le monde de la microélectronique. Pour l'industrie des semi-conducteurs, plusieurs pistes sont explorées pour rester compétitif, et qui se ramènent aux facteurs de succès de la démocratisation des dispositifs électroniques : le levier technologique (innovation, fonctionnalité, et performance) et le levier organisationnel (productivité, efficacité manufacturière, etc.).

Concernant la compétitivité selon le levier technologique, il est à noter la multiplication des voies de recherche. Encore plus critique, la capacité du système de production s'approche des limites des lois de la physique, rendant de plus en plus difficile de respecter les spécifications des produits les plus avancés. Aussi, le levier technologique nécessite d'importants coûts et sans aucune garantie sur le retour sur investissement. Ainsi, le potentiel de se différencier face à la concurrence est porté principalement par le levier organisationnel. En effet, une meilleure exploitation des ressources permet de mieux satisfaire le client en termes de qualité, de coût et de délai. Le challenge consiste à définir une organisation agile pouvant s'adapter aux évolutions de l'environnement (contextes économique et industriel, complexité technologique, etc.) et tenir compte de la complexité du système de production (hétérogénéité du parc équipement, spécifications produits à respecter, complexité des outils et techniques algorithmiques, etc.).

Dans un contexte d'entière automatisation avec la présence d'une forte composante informatique, la transformation organisationnelle doit systématiquement être accompagnée d'une évolution des différents systèmes d'information. En effet, ces derniers sont au cœur des activités opérationnelles. Dans ce sens, les utilisateurs au quotidien des systèmes d'information doivent « se retrouver » dans l'usage des systèmes d'information au niveau de ses fonctionnalités, et par sa capacité à répondre rapidement, et d'une façon continue, aux demandes d'évolution de l'organisation. Autrement dit, les systèmes d'information doivent être alignés sur les Métiers tout en pouvant suivre leur évolution.

Disposer de Systèmes d'Information (SI) à l'image des métiers n'est pas une vertu ou un luxe que les entreprises cherchent à obtenir. Le manque à gagner pour l'entreprise en l'absence d'alignement se traduit directement sur la performance de l'organisation : La non-adéquation des SI limite les tâches au quotidien et dégrade le potentiel de progrès de l'entière automatisation. Le système de production se trouve ainsi conditionné par les SI. Au-delà de l'aspect fonctionnalité recherché dans l'alignement, sa mise en œuvre se justifie également par le coût de sa mise en place comparé à un non alignement.

A travers ce manuscrit de thèse, nous décrivons les travaux visant à mettre en place un cadre méthodologique permettant de faciliter l'évolution des Systèmes d'Information (SI) dans un environnement industriel dynamique et complexe. Nos travaux de recherche sont fortement imprégnés par le contexte d'étude : l'industrie de fabrication des semi-conducteurs avec un mix fort (une grande variété) de produits, et comme cadre d'étude pratique l'unité de fabrication de composants électroniques STMicroelectronics Crolles300.

Nous cherchons à garantir un alignement systématique et continu des SI sur les besoins des processus métiers afin de garantir à l'entreprise les meilleures performances possibles dans l'exploitation de ses SI.

Les spécificités du contexte d'étude ainsi que l'analyse bibliographique de la problématique nous ont menés à proposer une méthodologie basée sur un « Modèle de Référence » afin de combler au mieux le fossé Métier / Technologie de l'Information (ou IT, par la suite nous considérerons semblables les termes IT et SI, nous reviendrons plus tard sur les définitions du SI). Cette méthodologie s'intéresse au niveau fonctionnel en mettant l'accent sur l'expression des besoins afin de mieux distinguer la vision Métier de la vision IT.

Pour valider la méthodologie que nous proposons, nous l'appliquerons sur un cas d'étude industriel relatif à l'évolution de l'ensemble des règles d'éligibilité des lots sur les équipements, appelées *processabilité*. Cette mise en œuvre industrielle nous permettra de juger de la pertinence de notre méthodologie pour son application dans un contexte complexe et dynamique.

2. Structure du manuscrit de thèse

La structure du manuscrit de thèse se présente comme suit. La thèse débute par une présentation du contexte industriel et pose la problématique du rôle critique que les SI jouent dans la fabrication des semi-conducteurs : Nous identifierons les propriétés nécessaires pour disposer d'un SI agile à l'image des métiers, dans un contexte industriel complexe et en constante évolution.

Ensuite, dans le deuxième chapitre, nous analysons les possibilités existantes dans l'état de l'art pour satisfaire les exigences du SI recherché en termes d'agilité propre à son fonctionnement. Nous abordons les différentes thématiques relatives à l'ingénierie de l'alignement et à l'architecture d'entreprise. Cette étude bibliographique nous permet d'évaluer la faisabilité de l'application des concepts d'alignement dans un contexte complexe et dynamique, et d'en souligner les limites.

Dans le chapitre 3, nous proposons notre méthodologie d'alignement par le Modèle de Référence. Cette proposition tient compte des apports et limitations constatés dans l'état de l'art par rapport à notre contexte d'étude industriel.

Le quatrième chapitre est consacré à la validation de la méthodologie proposée et à l'illustration de son application sur un cas d'étude réel de l'unité de fabrication STMicroelectronics Crolles300.

Le cinquième chapitre dresse une synthèse de la mise en œuvre industrielle du Modèle de Référence en abordant le volet conduite de projet ainsi que la définition des bonnes pratiques pour la construction du Modèle de Référence.

Enfin, nous terminons ce manuscrit par une conclusion synthétisant les travaux réalisés et en dressant différentes perspectives.

Chapitre 1

Contexte industriel et scientifique

Dans ce chapitre, nous présenterons les éléments caractéristiques de l'industrie des semi-conducteurs dans l'objectif de mettre en avant de l'intérêt de l'alignement Métier / IT dans ce contexte. Ainsi, nous dresserons dans la section 1.1 un état des lieux des évolutions technologiques et économiques de l'industrie micro et nanoélectronique. Ensuite dans la section 1.2, nous présenterons les caractéristiques de fabrication des dispositifs microélectroniques. Ce qui nous permettra, dans la section 1.3, de pointer les impacts de la complexité de cet environnement économique ainsi que de son dynamisme sur la trajectoire d'évolution des Systèmes d'Informations propres à ce milieu. Enfin, nous terminerons par dresser les enjeux scientifiques de ce travail de recherche.

1.1	L'industrie des semi-conducteurs	11
1.1.1	Les développements technologiques.....	11
1.1.2	Les développements économiques.....	14
1.2	Fabrication des semi-conducteurs	16
1.3	Enjeux et caractéristiques des systèmes d'information en fabrication des semi-conducteurs.	18
1.4	Enjeux scientifiques.....	23
1.5	Conclusion	24

1.1 L'industrie des semi-conducteurs

La démocratisation des composants semi-conducteurs est de plus en plus d'actualité. Déjà en 2010, on estimait¹ qu'un individu « moyen » utilisait par jour de plus de 250 puces électroniques soit plus d'un milliard de transistors ! En effet, les applications initiales des produits de la microélectronique dans le secteur militaire et « l'informatique des grands systèmes » se sont répandues pour conquérir tous les domaines : les télécommunications, les produits grands publics (en particulier de divertissement), les transports (automobile, avionique), l'industrie, la santé, etc. Cela a été rendu possible grâce à deux facteurs : (i) une miniaturisation poussée des composants, accompagnée d'une réduction drastique des coûts de production unitaire, et (ii) l'ajout constant de nouvelles fonctionnalités aux composants microélectroniques élargissant ainsi leur champ d'application (le passage d'un simple téléphone pour réaliser des appels à un appareil intégrant un appareil photo, un GPS, la navigation internet, etc.). Au cœur de l'économie numérique, l'industrie des semi-conducteurs constitue donc un secteur clé de l'économie en général.

Cependant, après une croissance à deux chiffres en moyenne durant les quarante dernières années, l'industrie des semi-conducteurs est confrontée aujourd'hui à de multiples défis :

- Explosion des coûts des installations de production,
- Extension des champs de recherche à explorer,
- Raccourcissement des cycles de vie des produits,
- Evolution du marché vers la maturité.

Pour comprendre ces défis et les spécificités de l'industrie micro et nanoélectronique, nous traçons ci-dessous son historique au travers de l'évolution de ses modèles économiques et technologiques (qui sont directement corrélés).

1.1.1 Les développements technologiques

L'industrie des semi-conducteurs est une des industries où la part des investissements en R&D est la plus importante. Pour STMicroelectronics par exemple, les dépenses de R&D sur les trois dernières années (2012 à 2014) représentaient environ 20% du chiffre d'affaire. Les travaux de recherche sont intenses aussi bien dans le domaine de la mise au point des matériaux et des technologies que dans celui des bibliothèques et des outils de conception pour les futurs produits. De nombreux scientifiques sont ainsi reconnus pour la qualité de leur contribution, avec par exemple *Willard Sterling Boyle* et *George Elwood*, des laboratoires *Bell* qui se sont vus décerner le prix Nobel de physique en 2009 pour l'invention du capteur d'image *CCD (Charge Coupled Device)*.

Les choix et cheminements technologiques suivent aujourd'hui trois tendances majeures :

- **More Moore.** La fameuse *loi de Moore* stipule que le nombre de transistors, par unité de surface, va doubler chaque année. Elle a été formulée en 1965 par *Gordon Moore*, l'un des fondateurs d'*Intel*, à la suite d'une constatation empirique sur les cinq premières générations de transistors CMOS. En 1975, les estimations de la densité d'intégration ont été revues où le doublement aurait lieu tous les dix-huit mois, puis quelques années plus tard à un doublement tous les deux ans. La réduction des

¹ Source interne STMicroelectronics Crolles, présentation du site Janvier 2012

dimensions des transistors a permis de réduire les coûts de production (coûts de production voisins par unité de surface de silicium amis plus de composants disponibles par unité de surface). Cette miniaturisation a également permis d'améliorer la performance des circuits (vitesse) et d'enrichir la gamme des fonctionnalités présentes sur un même composant. Ces éléments ont contribué à la démocratisation de l'usage des dispositifs électroniques.

Cette évolution technologique s'est également accompagnée d'une « interpénétration » des métiers traditionnels et exige désormais des prouesses organisationnelles et technologiques pour relever les challenges l'accompagnant (répartition des métiers de conception entre des filières « design » et « technologue », lien avec les métiers de la production pour des problématique du type *Design For Manufacturing* (Shahzad, et al., 2012) pour le contrôle des procédés, gestion des risques, gestion des flux, etc.).

- **More than Moore.** La démocratisation des dispositifs électroniques s'explique aussi par l'ajout de fonctions hétérogènes complexes sur la même puce (fonctions non digitales telles que l'optoélectronique, la radiofréquence, etc.). Cette extension des fonctionnalités disponibles a permis d'enrichir l'offre client en progressant principalement sur la simplification des interfaces entre le circuit et le monde extérieur. Ainsi, le développement des systèmes micro-électromécaniques *MEMS* (*MicroElectroMechanical Systems*) couplée à la communication à faible puissance ont par exemple ouvert la voie pour de nouvelles applications telles que les objets intelligents voire l'internet des objets. Le rythme soutenu d'introduction de nouvelles générations de transistors (appelée aussi *nœud technologique*) du « *More Moore* », exige des investissements humains et matériels de plus en plus importants et le nombre des acteurs présents sur le secteur s'est considérablement réduit au fil des ans, favorisant l'exploration de nouvelles pistes de valorisation, notamment avec le *More than Moore*.
- **Beyond CMOS.** De nombreuses opportunités de croissance ont pu voir le jour grâce à la combinaison du *More Moore* (plus de puissance de calcul, plus rapidement) et le *More than Moore* (plus d'interfaces avec l'environnement, des données plus simples à intégrer). Cependant, même ce lien commence aussi à s'essouffler face au rythme d'introduction de nouvelles technologies : l'évolution de la technologie CMOS sera bientôt bloquée par des limites à la fois physiques et économiques. Les limites physiques sont en lien avec la barrière isolante qui sépare la grille du transistor et le canal (séparation de quelques atomes) : la poursuite de la miniaturisation rend cette barrière si fine que la fuite du courant compromet la fiabilité des transistors (phénomène d'effet tunnel / courant de fuite en position fermée du commutateur). Quant à la limite économique, les coûts des installations, déjà extrêmement élevés, le seront encore davantage pour la fabrication des nouveaux nœuds technologiques (nous parlons en milliards de dollars pour les unités de fabrication). C'est d'ailleurs la raison pour laquelle il existe de plus en plus d'alliances (entre états et industriels) pour la mise en place de nouvelles installations. Ainsi, plusieurs projets de recherche sont en cours d'exploration pour utiliser d'autres architectures que celle actuelle du transistor CMOS (avec la remise en cause des techniques de fabrication sur silicium).

Ces développements technologiques (*More Moore*, *More than Moore*, *Beyond CMOS*) ont façonné le paysage de l'industrie des semi-conducteurs, que ce soit au niveau de la diversification des produits que les choix industriels. Vu la complexité des procédés, les coûts engendrés, et le vaste champ

de recherches à explorer, un consortium regroupant les acteurs de l'industrie des semi-conducteurs a vu le jour : l'ITRS (*International Technology Roadmap for Semiconductor*). Son rôle est d'apporter des solutions face aux enjeux de cette industrie par le partage d'une vision « claire » avec des objectifs communs. L'ITRS propose des feuilles de route permettant la coordination et la coopération entre les acteurs de l'industrie des semi-conducteurs. En effet, il est devenu délicat de définir des stratégies technologiques (avec leurs impacts sur les process, sur le système de production, etc.) dans un contexte incertain et dynamique. La Figure 1.1 synthétise le lien entre les différents axes d'évolution.

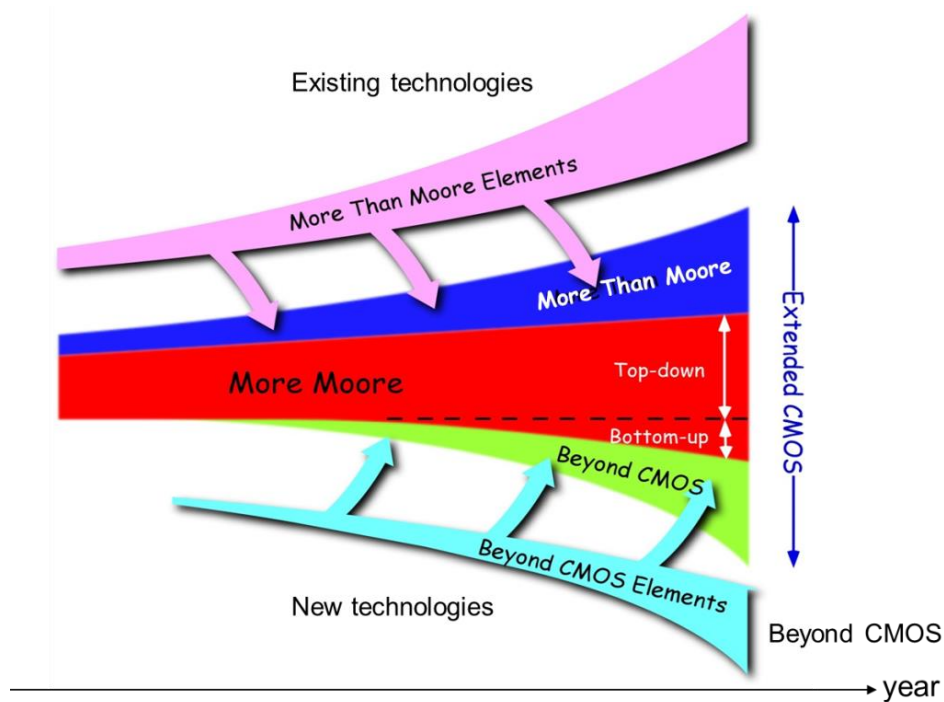


Figure 1.1 : Liens entre les lois More Moore, More than Moore et Beyond CMOS (ITRS, 2011)

Le choix est établi de poursuivre la politique de miniaturisation, avec des efforts d'intégration de technologies (existantes et nouvelles) au travers les voies *top down*² et *bottom up*³. La question que nous nous posons avec cette configuration est alors la suivante « Nous savons que les modèles actuels doivent évoluer en permanence... mais comment répondre aux nouvelles exigences ? ».

L'ensemble des développements technologiques a impacté le développement économique (et vice versa), nous décrirons dans ce qui suit les développements économiques de l'industrie des semi-conducteurs.

² Elle consiste à pousser jusqu'à ses limites extrêmes la miniaturisation du transistor MOS, dans la continuité des travaux des 40 dernières années.

³ Il s'agit d'assembler la matière atome par atome, pour construire des molécules à intégrer ensuite dans des transistors d'une conception entièrement nouvelle. Cette voie fait appel à des connaissances fondamentales de physique et de chimie.

1.1.2 Les développements économiques

Dans les années 70, l'ensemble de la chaîne de valeur était maîtrisée par des structures verticalement intégrées. Elles centralisaient les activités de R&D, la conception des produits et leur production, voire même le développement des outils nécessaires à leurs activités (équipements, outils de conception, etc.). Cette époque correspond au début de la *loi de Moore* où les challenges technologiques et financiers demeuraient « relativement raisonnables / maîtrisables ». Cependant, la complexité croissante des technologies à industrialiser, associée à un décuplement des investissements nécessaires (construction de nouvelles unités de production, machines plus sophistiquées et plus coûteuses, etc.) ont profondément impacté la structure de la chaîne de valeur.

A partir des années 90, nous commençons à assister à une fragmentation des structures verticalement intégrées en des structures spécialisées aux rôles distincts. Cette transformation apportait à l'industrie des semi-conducteurs un moyen de poursuivre sa croissance et de continuer à répondre aux exigences de développement technologique. Les spécialisations des nouvelles structures sont issues des firmes initiales verticalement intégrées comme illustré dans la Figure 1.2.

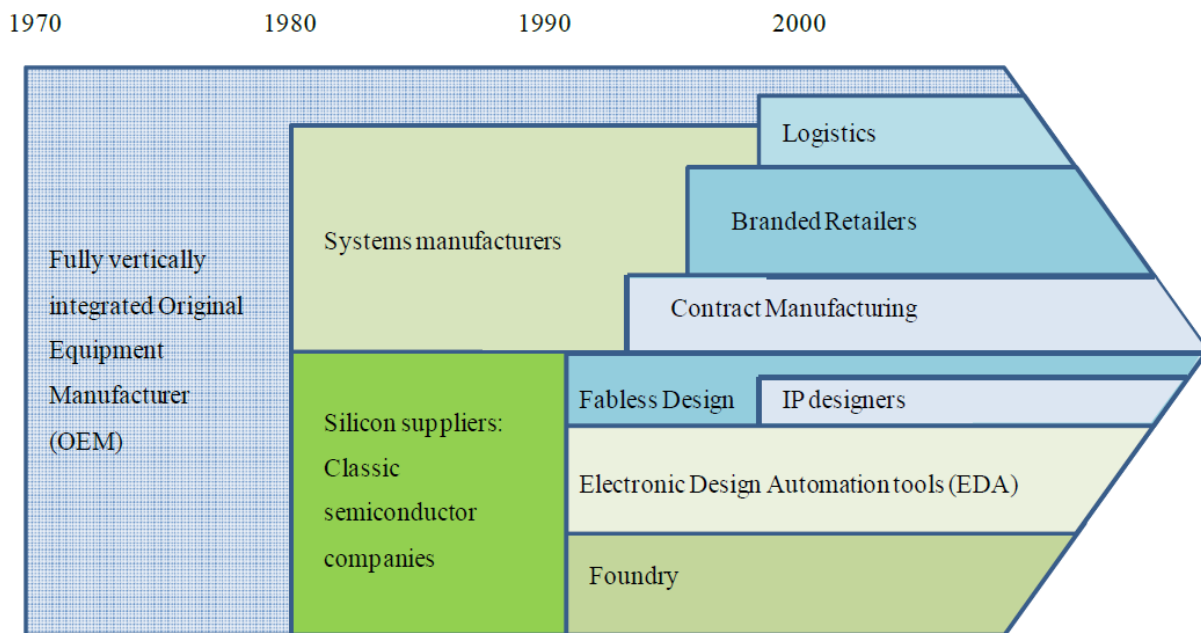


Figure 1.2 : Evolution des modèles économiques dans l'industrie des semi-conducteurs (Bozotti & Bühner, 2005)

Ainsi, en parallèle de la structure IDM « historique » (*Integrated Device Manufacturer* = qui assure la conception et la production en interne), un certain nombre de nouvelles structures sont apparues. Les plus notables sont :

- **Les fondeurs** (« *foundry* »). Ils réalisent uniquement des activités de production. Ils disposent d'un outil de production spécialisé couvrant un faible mix technologique avec d'importants volumes de production. Nous parlons alors de « *giga fab* » pour les unités de production des plus gros fondeurs :

les investissements sont colossaux (plusieurs milliards d'euros par an) et la capacité est mise en place « en une fois » avec des équipements de même génération et de même type. Cette spécialisation diminue incontestablement la variabilité des *process* et simplifie considérablement un certain nombre de problématiques de gestion de production en terme d'optimisation des flux, de contrôle qualité, de gestion des risques, etc. Les importants volumes de production apportent une économie d'échelle et une réelle diminution des coûts de fabrication. Ce modèle a prouvé son efficacité mais réclame des investissements énormes, sachant que pour être attractifs, les fondeurs doivent également être à la pointe des activités de R&D afin de proposer en permanence les dernières technologies. La part des investissements à réaliser chaque année pour maintenir les capacités de production à un niveau correct n'est pas négligeable. C'est ce qui a notamment poussé beaucoup d'IDM sur la voie du *fablite* (capacité de production limitée au départ pour réduire le risque financier, le fondeur assurant la production en volume si le marché est là plus tôt que prévu) voire du *fabless* (assurant uniquement la conception des circuits intégrés).

- **Les *fabless*.** Principaux clients des fondeurs, ils ne disposent pas de capacité de production et se concentrent sur les activités de conception des circuits intégrés. Ces dernières sont les activités les moins mobilisatrices en capitaux et représentent également les activités les plus rentables. La production est ainsi sous-traitée aux fondeurs. Sur un autre plan, nous soulignons que la complexité croissante des dispositifs électroniques a permis l'émergence de nouveaux acteurs spécialisés dans les outils de conception. Notons que plusieurs entreprises ont abandonné leur modèle intégré vu le coût des nouvelles unités de production, car elles ont estimé qu'elles n'étaient pas en mesure de concurrencer les fondeurs (en terme de prix et de qualité). D'autres entreprises ont choisi dès le départ de se concentrer exclusivement sur la conception telle que *Qualcom*.
- **Les *fablites*.** C'est le modèle le plus récent qui correspond au nombre le plus faible parmi les acteurs de l'industrie des semi-conducteurs. Bien qu'ils rassemblent les activités de conception et de production, nous ne pouvons les comparer aux IDM vu leur faible capacité de production. Les *fablites* se caractérisent aussi par le positionnement sur des marchés de niche qui leurs permettent de monter dans la chaîne de valeur. Aussi, ils offrent l'avantage de rapprocher les activités de R&D de la production, offrant une flexibilité pour accompagner les développements des nouveaux produits. Ce type de structure se caractérise également par un faible volume de production et une diversité importante des produits (par exemple, jusqu'à 1100 références peuvent simultanément être produites sur le site Crolles300 de STMicroelectronics). Sur le plan manufacturier, l'usage d'équipements hétérogènes au sein des mêmes lignes de production, pour réaliser différents produits de technologies ayant jusqu'à dix ans d'écart, soulève des problématiques spécifiques que nous retrouvons rarement dans d'autres structures. Plusieurs travaux traitent des problématiques spécifiques aux unités de production à mix (variété des produits) important telles que l'échantillonnage des lots et le contrôle des procédés (Nduhura Munga, et al., 2011) (Sahnoun, et al., 2014), la gestion des qualifications et l'équilibrage des charges (Johnzén, et al., 2011) (Rowshannahad, et al., 2015), la gestion des risques (Mili, et al., 2009), etc.

La complexité croissante des dispositifs électroniques et les coûts de plus en plus élevés des installations de production ont contribué à fragmenter la chaîne de valeur. Un nouveau tissu d'acteurs a émergé autour des structures issues des IDM : des fournisseurs de solution d'automation, d'outils de

conception, de robotisation et de manutention, d'analyse de données, etc. De même, nous rencontrons de moins en moins de fabricants de dispositifs microélectroniques selon que les nœuds technologiques sont de plus en plus réduits, comme indiqué sur la Figure 1.3.

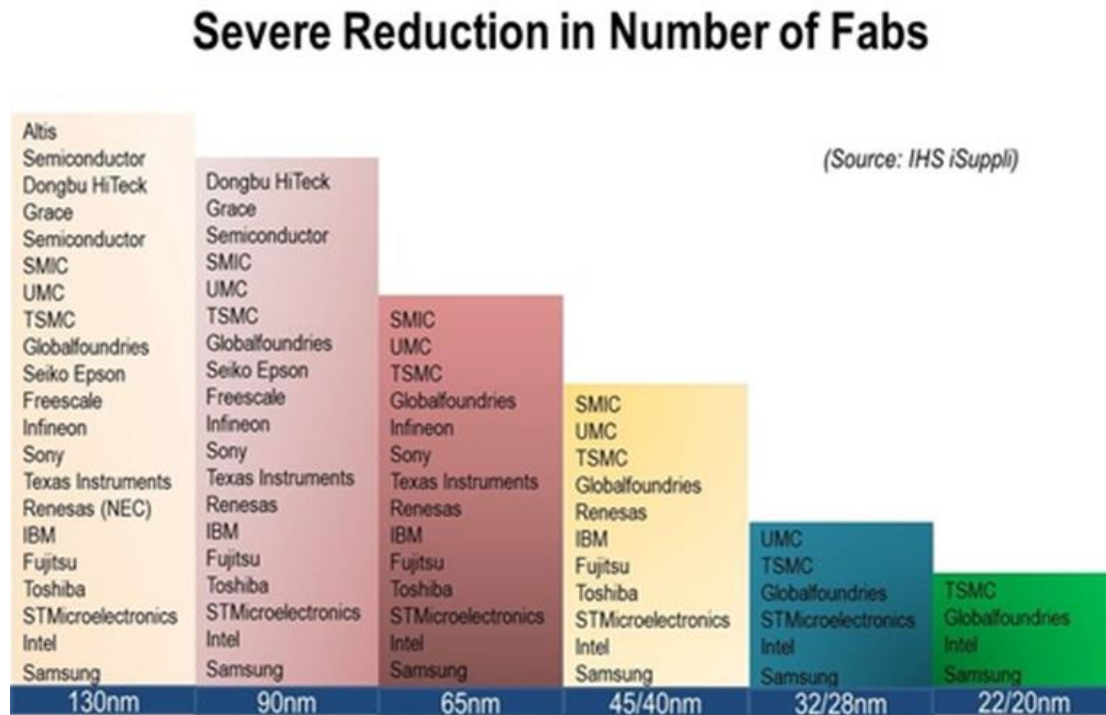


Figure 1.3 : Réduction du nombre des fabricants de semi-conducteurs en fonction des nœuds technologiques

Dans la Figure 1.3, nous remarquons la présence d'un grand nombre d'acteurs sur les nœuds technologiques 130nm jusqu'au 45/40nm. Cela s'explique par la maturité technologique de ces nœuds, où les investissements sont amortis et où les marchés adressés se caractérisent par leur longévité (composants pour les systèmes industriels et automobiles, avec des exigences d'assurer la continuité de livraison pour de longues périodes). A partir des nœuds technologiques 32/28nm et en dessous, le nombre d'acteurs est considérablement réduit. Ce phénomène s'explique par les investissements colossaux requis pour ces technologies, que seuls quelques grands fabricants ont le moyen de financer.

Dans ce qui suit, nous présenterons le processus de fabrication d'un dispositif électronique, et nous soulignerons leurs implications pour les unités à mix important de produits.

1.2 Fabrication des semi-conducteurs

L'élément de base de la microélectronique est le transistor, construit sur un matériau semi-conducteur. Le transistor MOS (Métal, Oxyde, Semi-conducteur) est le plus fréquemment utilisé dans la

fabrication des circuits intégrés. La combinaison des différents transistors, associant rapidité et densité d'intégration, permet de réaliser des circuits : les plus denses sont les mémoires, et les plus complexes sont les microprocesseurs (ils peuvent être constitués de plusieurs centaines de millions de transistors). Le nœud technologique d'une puce est associé à la largeur de grille du transistor le plus fin réalisable. Exemple : un nœud en « 28nm » permet de réaliser des puces contenant des transistors avec une largeur de grille de 28 nanomètres. La technologie de la puce prend également en compte la technique de fabrication (CMOS, Flash, Imager, etc.). Ainsi, pour STMicroelectronics, une puce en C028 signifie que les transistors ont une largeur de grille en 28 nanomètres avec une technologie de fabrication en CMOS.

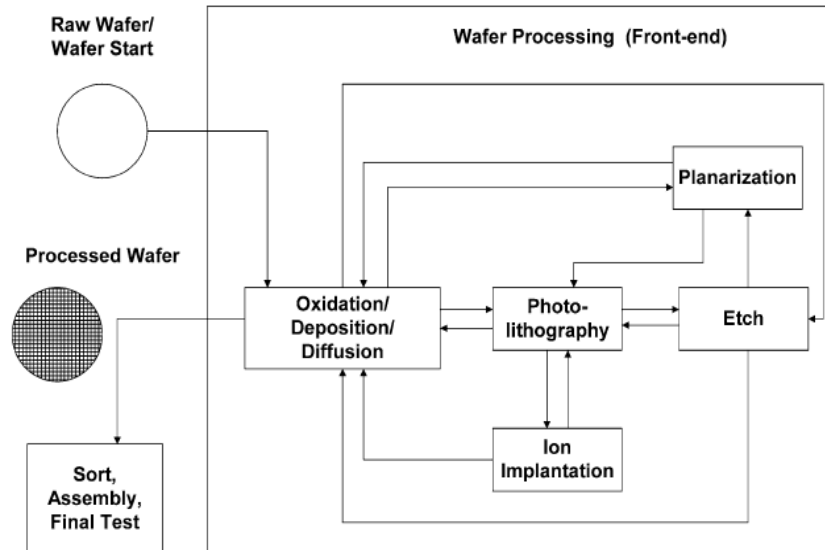


Figure 1.4 : Schéma de production de dispositifs électroniques en zone Front-End (Mönch, et al., 2011)

Le matériau de base des circuits intégrés est le silicium (élément chimique le plus répandu sur terre). Extrait du sable par réduction, il est cristallisé sous forme de barreaux de 20 ou 30 cm de diamètre, ensuite coupé / tranché par une épaisseur de moins d'un millimètre d'épaisseur. C'est sur cette tranche / plaquette / wafer que les puces électroniques sont fabriquées. Sur la partie *Front-End*, la fabrication se fait par la répétition et la combinaison de plusieurs opérations comme indiqué sur la Figure 1.4 : dépôts et retraits sélectifs de matériaux, lithographie (« dessiner » les motifs des circuits), gravure, dopage, et d'interconnexion, puis de découpe. Les composants sont ainsi créés sur des puces qui vont être ensuite assemblées dans des boîtiers (la partie *Back-End*) avant d'être intégrés dans les applications.

La fabrication des circuits intégrés est un processus délicat à maîtriser. L'environnement de production est très sensible aux contaminations (particulaires, ioniques, etc.). À l'échelle d'une puce, un minuscule grain de poussière représente un rocher qui « obstrue » potentiellement les chemins creusés pour la circulation des électrons. C'est pourquoi la fabrication a lieu en salle blanche, vaste infrastructure industrielle où l'air est filtré et stabilisé en température et en hygrométrie et entièrement renouvelé 10 fois par minute. Par exemple, l'unité de fabrication Crolles300 de STMicroelectronics

dispose d'une salle blanche d'une *classe 4*⁴ pour une superficie de plus de 10 000 m². De plus, de nombreuses opérations de nettoyage des tranches sont menées entre les étapes de fabrication. Au total, elles représentent presque un tiers du temps total de process. Une autre caractéristique majeure est que, du fait de l'évolution technologique permanente, les équipements sont sollicités à la limite de leur capacité. Une erreur de manipulation, quelques secondes en plus ou en moins, et ce sont plusieurs centaines de circuits qui finissent au rebut (une plaquette en fin de cycle peut valoir jusqu'à 100 k\$ pour certains produits) ! Aussi, le cycle de fabrication est important, variant entre 6 et 8 semaines, pour un nombre d'opérations pouvant dépasser 600 pour les technologies récentes. En fonction des procédés utilisés, les opérations peuvent être réalisées à l'unité (« plaque à plaque ») ou par groupe de « lots » (généralement, un lot contient 25 plaquettes), appelé aussi *batch*. Pour gérer la fabrication, les unités de production sont organisées en ateliers flexibles : différents produits, à différentes phases de maturité technologique, se côtoient sur une même ligne de production (elle-même constituée d'équipements hétérogènes : différents fournisseurs avec différentes phases de maturité). Nous pouvons ainsi rencontrer des cas de figures où sont présents simultanément en fabrication des prototypes et des produits utilisant des technologies mûres. Pour réaliser cette flexibilité, une attention particulière doit être apportée à l'aptitude des moyens de production à répondre aux exigences de fabrication (maîtriser le risque de contamination, respecter les spécifications « produit », maîtriser la variabilité, etc.). En outre, au-delà du défi technique lié à la réalisation des opérations (spécifications « produit » de l'ordre du nanomètre), se rajoute une complexité organisationnelle pour la gestion des flux, la sécurisation de la production, et un pilotage optimal du système global. **Seule une forte automatisation permet de répondre aux exigences techniques de fabrication, à l'impératif de flexibilité (pour amortir les investissements) et à la maîtrise du pilotage des opérations.**

Cependant, cette automatisation doit elle-même être flexible pour répondre aux spécificités de l'industrie des semi-conducteurs en terme de dynamisme (pour suivre le rythme de renouvellement des technologies et leur diversification) et d'incertitude (multiplication des voies de recherche pour les nouvelles technologies avec leur conséquence sur l'outil de production). À cela s'ajoute la vitesse de l'obsolescence des nouveaux produits. Face à cette situation, quelles doivent être les caractéristiques des systèmes d'information pour la fabrication des semi-conducteurs ? Nous détaillerons ce questionnement dans le paragraphe suivant.

1.3 Enjeux et caractéristiques des systèmes d'information en fabrication des semi-conducteurs

Parmi les industries manufacturières les plus complexes et critiques, la fabrication de semi-conducteurs est sans doute celle qui a connu l'évolution la plus rapide (Moyne, et al., 2010). Elle est portée par une demande croissante de circuits intégrés dans tous les domaines de notre vie. Challengeés pour leur aptitude à industrialiser rapidement et efficacement les nouveaux produits, les systèmes de

⁴ moins de 4 particules de plus d'1 micromètre de diamètre au pied cube.

production automatisés s'appuient sur des applications / solutions informatiques permettant le pilotage et l'exécution des opérations de fabrication.

La spécificité de l'industrie des semi-conducteurs, et particulièrement pour les fabricants offrant une large gamme de produits et de technologies, est que le rythme d'évolution des besoins des différents métiers de la production est très important. L'introduction continue de nouveaux produits et l'industrialisation de nouvelles technologies exigent un développement quasi continu de nouvelles fonctionnalités des systèmes de gestion et de contrôle de la production, au travers par exemple de l'introduction de nouveaux outils ou de l'interconnexion de différents systèmes existants. De plus, pour les IDM (fabricants intégrant la conception et la réalisation des produits) et pour les lignes de production existantes, cette évolution s'accompagne d'une difficulté supplémentaire : la prise en compte de l'existant et l'exigence d'un déploiement « transparent » (i.e. sans perturbation de l'outil de production). L'assiette des paramètres à prendre en compte et des systèmes d'information à intégrer constitue bien souvent un ensemble inextricable. Si les solutions existantes pour la gestion de la production et des procédés de fabrication étaient jugées satisfaisantes jusqu'à il y a peu, elles ont aujourd'hui clairement atteint leurs limites et une remise en cause globale du mode de conception et d'évolution de ces systèmes est aujourd'hui nécessaire.

L'évolution des contraintes métier à intégrer dans les systèmes d'information est liée à plusieurs grands facteurs d'évolution :

- complexité des technologies : en termes de nombre d'étapes élémentaires, mais aussi de processus de régulation et de contrôle inter-étapes.
- complexité des lignes de production : accumulation des technologies produites sur une même ligne, hétérogénéité du parc équipement, gestion de l'historique (systèmes informatiques obsolètes et non supportés), etc.
- contexte économique et industriel : volatilité de la demande, alliances industrielles imposant l'intégration d'accès spéciaux depuis l'extérieur de l'entreprise, supply chain multi-sites et multi partenaires donc aussi multi-langues.
- contraintes réglementaires et légales liées à la sécurité des personnes, au poids des plaquettes, à l'utilisation de certains composés chimiques et à l'élimination des rejets, etc.
- automatisation des lignes de production : intégration (progressive !) de systèmes pour le transport des produits et des masques, supervision globale de l'activité, détection et traitement des anomalies avec la « disparition » progressive de l'humain d'un côté et la gestion « hors système » de certaines opérations de R&D
- complexité des outils et techniques algorithmiques à mettre en œuvre : Optical Proximity Control (OPC), Métrologie Virtuelle, Maintenance Prédictive, Scheduling, etc.

Si certaines de ces évolutions sont classiques (respect des réglementations, automatisation d'une unité de production...), c'est leur mise en œuvre dans un contexte « zéro impact production » qui représente le véritable challenge. Le système doit ainsi évoluer « en douceur », sans remettre en question l'existant.

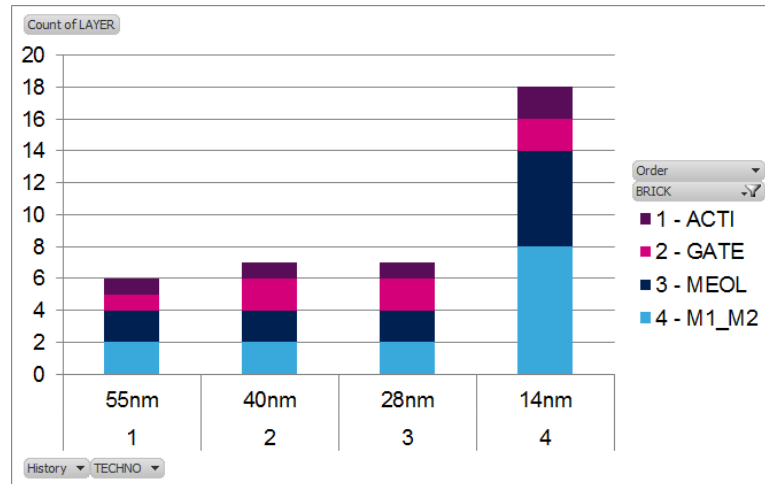


Figure 1.5 : Nombre de masques nécessaires pour la réalisation des étapes critiques de 4 générations technologiques CMOS

Pour celles qui sont liées à la technologie, c'est vraiment l'atteinte des limites de la physique, de la faisabilité industrielle qui requiert la mise en place de nouveaux outils informatiques pour le contrôle et la maîtrise des phénomènes physiques mis en jeu lors de la réalisation des produits. La Figure 1.5 donne par exemple le nombre de niveaux de masquage nécessaires à la réalisation des mêmes étapes critiques pour quatre générations technologiques différentes. On constate ainsi que s'il est resté stable jusqu'au nœud 28nm, ce nombre est multiplié par trois pour passer au 14nm.

Ce facteur trois s'explique à l'aide de la Figure 1.6. En Photolithographie, c'est la longueur d'onde d'exposition (λ) qui donne la dimension minimale atteignable (CD min), l'ouverture numérique (NA) étant elle principalement déterminée par la forme de la lentille et son matériau. Ainsi, l'introduction de lasers 193nm (puis de la version « immersion ») a permis l'industrialisation des technologies jusqu'au 28nm, mais au prix d'artifices techniques de plus en plus complexes. L'introduction du « multi-patterning » qui consiste à réaliser plusieurs expositions successives de motifs différents pour obtenir le motif final, nécessite par exemple la mise en place d'outils informatiques de contrôle et de compensation de processus extrêmement avancés.

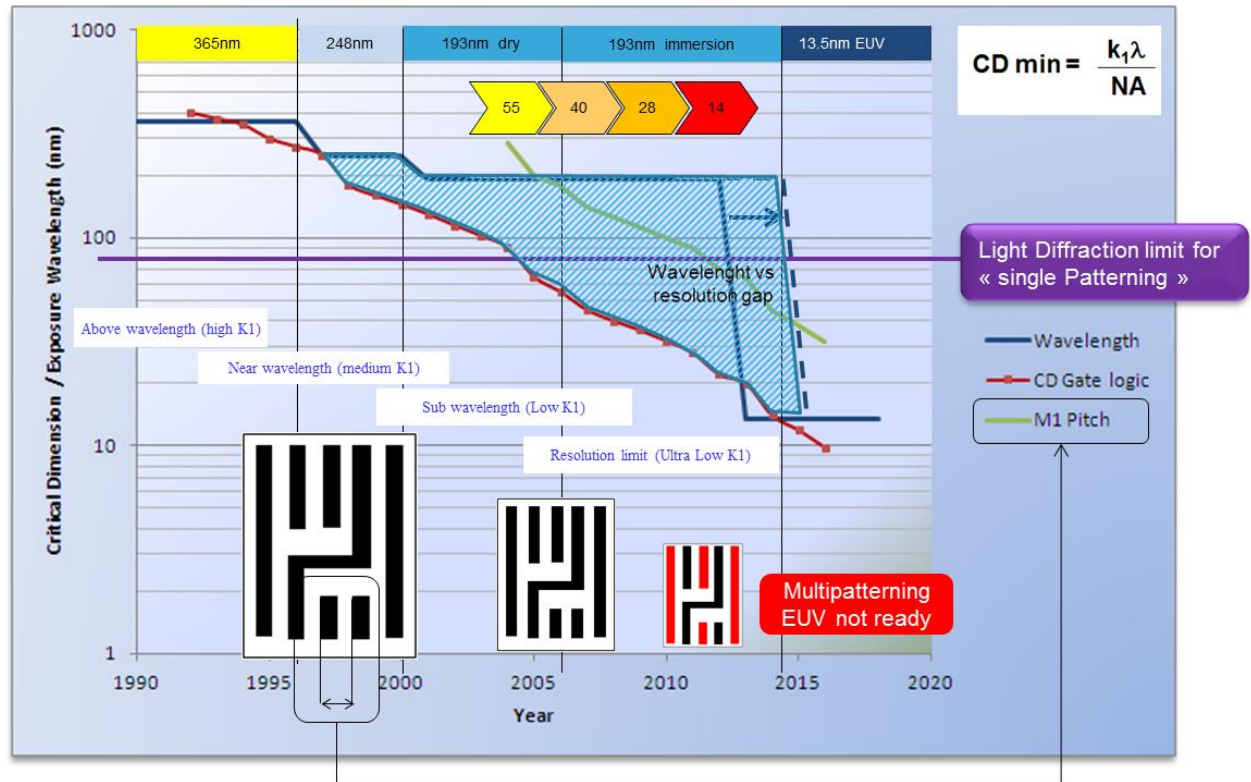


Figure 1.6 : Les limites de la résolution en Lithographie

Pour schématiser, le fossé technologique représenté par l'aire hachurée de la Figure 1.6 n'a pu être aujourd'hui franchi que grâce à la mise en place d'outils informatiques extrêmement complexes tant du point de vue algorithmique (complexité des phénomènes physiques mis en jeu) que du point de vue informatique (intégration des systèmes de mesure, de régulation, de contrôle des recettes, automatisation équipement de process et de mesure, prise en compte équipement amont / aval, données OPC, caractéristiques masques issues de la base fournisseur, etc.).

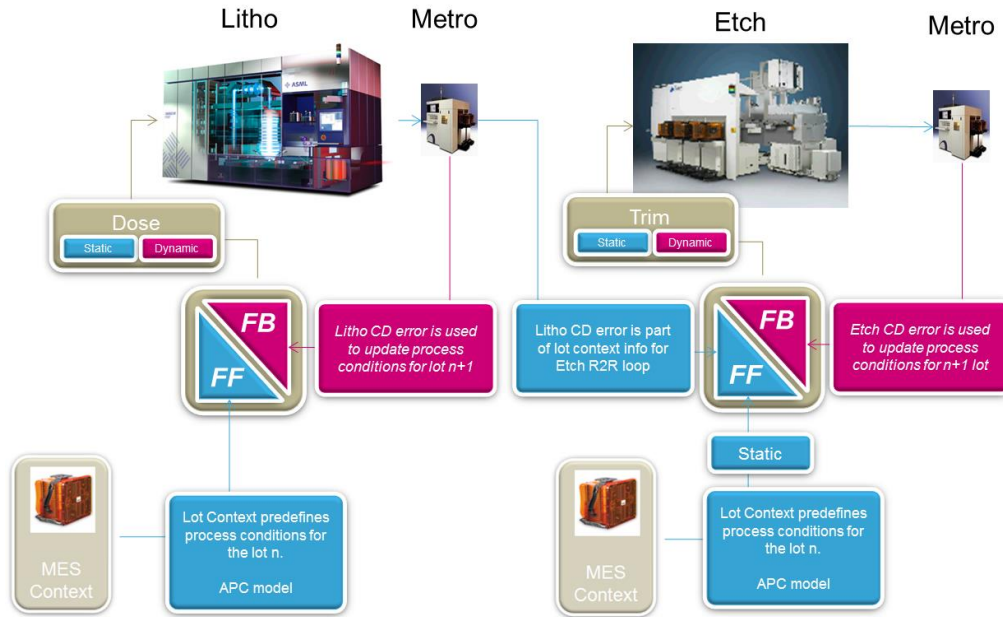


Figure 1.7 : Exemple de boucles de régulation
FF (Feed Forward) et FB (Feed Backward) en Lithographie

Pour faire face à toutes ces nouvelles contraintes, les fabricants de composants semi-conducteurs n'ont d'autres choix que de les intégrer dans leurs systèmes de gestion de la production. Cette intégration se fera à différents niveaux en fonction de la complexité de la contrainte à intégrer et des solutions vues comme « disponibles », « atteignables » ou « raisonnables ». Ainsi, bon nombre de ces contraintes sont encore traitées de façon « semi-manuelle », faute d'une intégration satisfaisante dans le système d'information existant.

À titre d'exemple, la notion d'autorisation de réaliser les opérations nécessaires à un lot par les équipements en fonction du temps et de l'opération (de la gamme de fabrication) à laquelle se trouve le lot (nous l'appellerons la *processabilité*) a été exprimée par les opérationnels. Cependant, aucun outil informatique ne permettait de prendre entièrement en charge cette demande, nous y reviendrons plus en détail dans le chapitre 4.

Autant les systèmes d'information sont un atout pour apporter une flexibilité aux unités de fabrication (gestion des flux, coordination des opérations, etc.), autant ils sont « démunis » face à des évolutions non anticipées. Autrement dit, toute nouvelle exigence terrain non planifiée rencontre des difficultés à être prise en compte au niveau informatique, voire se heurte à des situations de blocage. Face à ce type de situation, chaque partie prenante métier prend bien souvent la main pour développer en interne ses propres solutions (qui se limitent généralement à du support à la décision). Ces solutions sont extrêmement personnalisées (les offres du marché demeurent assez génériques) et ne disposent pas d'une vision globale au niveau SI. Le manque d'interopérabilité entre les différentes applications induit alors une dégradation de la performance globale de l'organisation (information non partagée, risque de redondance et de dédoublement des sens / définitions, etc.).

Vu le dynamisme de l'industrie des semi-conducteurs et la multitude des pistes d'évolution (par le développement de nouvelles technologies), disposer d'un SI pouvant suivre le changement dans un environnement complexe, dynamique, et incertain constitue incontestablement un avantage compétitif (efficience du pilotage du système de production, livraison client plus rapide, etc.).

Nous dresserons dans ce qui suit les enjeux scientifiques découlant des caractéristiques et enjeux des SI en fabrication des semi-conducteurs.

1.4 Enjeux scientifiques

L'automatisation croissante de la fabrication et des processus décisionnels, les SI sont aujourd'hui au cœur des activités opérationnelles des entreprises. Les principales caractéristiques de ces SI pour les fabricants de semi-conducteurs sont :

- **Une forte dépendance informatique.** Une part importante de la connaissance doit être numérisée afin de pouvoir être véhiculée au travers des systèmes automatisés de la production. Cela concerne les règles métiers et leur impact sur la gestion des flux, les techniques de maintenance, etc.
- **Coopération entre les différents SI.** Malgré la diversité des métiers et leurs spécificités, les évolutions technologiques les poussent à une convergence fonctionnelle : Des métiers traditionnellement séparés se trouvent aujourd'hui à communiquer et partager le même périmètre d'action, et de même pour les SI qui leurs sont relatifs.
- **Une rapide évolution des SI.** En conséquence de l'automatisation, et de la permanente évolution des métiers, les SI se trouvent eux aussi confronté à la problématique d'une forte évolution. Cela implique d'avoir des systèmes orientés services, qui soient faiblement couplés portant flexibilité et autonomie. De plus, vu l'exigence de continuité de fonctionnement des SI, nous constatons (i) des problématiques de cohérence entre les différentes versions, (ii) une altération de la structure modèle au fil des années et des modifications, avec des contraintes supplémentaires pour la maintenance et l'évolution des SI, (iii) multitudes des axes d'évolution des SI (perte de la trajectoire d'évolution du SI), (iv) remplacement des technologies informatiques obsolètes avec de nouvelles, portant des risques inconnus / peu maîtrisé (pas suffisamment de retour d'expériences), et (v) la non prise en compte des besoins des utilisateurs en conséquences ce qui précèdent.

Aussi, pour les fabricants de semi-conducteurs avec une forte variété de produits, la prise en compte de la dimension temporelle et son interprétation sont primordiales pour l'analyse des SI et de la situation existante. Dans la quasi-majorité des cas, la durée de vie des solutions informatiques est plus courte que celle de l'infrastructure/configuration Métier et des besoins qui en découlent. Les mises à jour et les nouvelles fonctionnalités proposées au niveau IT devancent toujours les besoins des parties prenantes. Alors que, dans un contexte complexe et dynamique comme en fabrication de semi-conducteurs, l'aspect temporel prend une interprétation différente. Découlant des impératifs opérationnels au niveau des procédés de fabrication, les besoins des métiers de la production évoluent à un rythme dépassant celui de la mise en œuvre des solutions informatiques correspondantes. Cette spécificité n'est pas due à une limitation des ressources IT ou de leur organisation. Les impératifs de continuité de fonctionnement, la complexité des changements à apporter sur des SI déjà complexes, la

multitude et la fréquence des demandes de modifications font que les solutions livrées sont déjà dépassées par l'avènement de nouveaux besoins métiers. Une conséquence majeure de cette situation est que l'expression des besoins des utilisateurs est biaisée par la disponibilité des solutions informatiques, brouillant ainsi l'évolution du sens fonctionnel au niveau métier et la trajectoire de l'évolution des systèmes d'information (SI).

Ainsi, nous résumons la caractéristique recherchée pour les SI en fabrication des semi-conducteurs par ce questionnement « *comment pouvons-nous disposer d'un SI qui puisse suivre les évolutions métiers dans un environnement complexe, dynamique et incertain ?* ». Autrement dit, comment disposer d'un SI qui porte en lui la caractéristique d'agilité. L'agilité visée ici ne porte pas uniquement sur la méthode de livraison du SI, c'est une agilité à considérer comme une propriété de ce dernier.

Le premier questionnement nous conduit à soulever un deuxième point : « *Comment prendre en compte les différences de rythmes d'évolution entre les besoins métiers et la capacité à livrer les systèmes d'information à terme ?* ».

Les deux points précédents reviennent alors à s'interroger sur « *Quel est le moyen de maîtriser la complexité, la dynamique et l'incertitude dans la fabrication des semi-conducteurs dans son lien avec l'IT ?* ».

1.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'industrie des semi-conducteurs avec ses évolutions au niveau des modèles économiques et technologiques. C'est un secteur qui a connu plusieurs transformations qui ont impacté la structure même de l'outil de production et la stratégie de sa gestion. Suite à notre description du processus de fabrication des dispositifs électroniques, nous avons mis en avant l'imbrication de ces transformations et la complexité / criticité des opérations de production. En effet, l'automatisation des moyens de production et leur pilotage informatique est devenu un standard étant donné les enjeux. L'environnement dynamique de l'évolution des technologies, pas toujours anticipée, ont créé un écart d'alignement entre la réalité des besoins métiers et la vision IT correspondante. Dans une industrie où la compétitivité technologique est quasi saturée (système de production aux limites des lois de la physique), le levier organisationnel constitue un atout majeur comme moyen de différenciation par rapport à la concurrence. Ainsi, nous avons souligné les caractéristiques des SI pour la fabrication en semi-conducteurs ainsi que les enjeux scientifiques visés.

Dans le chapitre suivant, nous établirons un état de l'art sur les problématiques d'alignement Métier / IT, les moyens de l'atteindre, ainsi que les limites rencontrées aujourd'hui.

Chapitre 2

État de l'art

L'objectif de ce chapitre est de poser les éléments bibliographiques permettant d'atteindre l'alignement d'une façon générale, et plus particulièrement dans les environnements complexes et dynamiques tels que celui de la fabrication des semi-conducteurs. Une première section introduit les définitions des SI et les notions de flexibilité et d'agilité. La section 2.3 présente le concept d'alignement, ses différentes démarches ainsi que les limitations de leur application en fabrication des semi-conducteurs. La section 2.4 présente l'intérêt de l'architecture d'entreprise pour l'alignement et soulève également ses limitations. La cinquième section aborde d'autres thématiques relatives à l'alignement soulignant sa multidisciplinarité.

2.1	Introduction.....	26
2.2	Les systèmes d'information.....	26
2.2.1	Qu'est-ce qu'un système d'information ?	26
2.2.2	Adaptabilité du système d'information.....	28
2.3	L'alignement Métier / IT.....	29
2.3.1	Le concept d'alignement	29
2.3.2	Description du <i>Strategic Alignment Model</i> (SAM)	31
2.3.3	Flexibilité, agilité et alignement	33
2.3.4	Les démarches d'alignement et leurs limites.....	35
2.3.4.1	Synthèse / applicabilité des démarches d'alignement.....	35
2.3.4.2	Limitations des approches d'alignement	39
2.4	L'Architecture d'Entreprise	40
2.4.1	Généralités sur l'architecture d'entreprise	40
2.4.2	Lien Architecture d'entreprise – Alignement – Agilité.....	42
2.4.3	Les différents cadres de modélisation d'entreprise.....	43
2.4.4	Limitations et dilemme de l'Architecture d'Entreprise.....	45
2.5	Autres concepts relatifs à l'ingénierie de l'alignement.....	46
2.5.1	L'ingénierie des Exigences.....	46
2.5.2	Potentiel des ontologies.....	47

2.5.3	Les objets frontières	48
2.5.4	Méthodes de développement agile en informatique	48
2.6	Conclusion	48

2.1 Introduction

Dans le chapitre 1, nous avons défini les caractéristiques des SI pour la fabrication de semi-conducteurs, et d'une façon générale pour les entreprises fortement automatisées évoluant dans un cadre complexe et dynamique. Les SI constituent un levier compétitif et pour en optimiser l'usage, ils doivent être alignés et suivre les changements au niveau des processus métiers des organisations. En effet, au-delà de l'agilité des méthodes de développement des SI, nous cherchons à obtenir une agilité propre au fonctionnement des SI.

Nous présenterons d'abord dans ce chapitre les différentes définitions des SI et leur articulation par rapport aux notions d'agilité et flexibilité. Ensuite, nous présenterons le concept d'alignement. Nous nous intéresserons au volet agilité et aux démarches actuelles. Puis, nous présenterons l'intérêt de l'architecture d'entreprise pour l'alignement. Enfin, nous aborderons l'aspect multidisciplinaire de l'alignement.

2.2 Les systèmes d'information

Dans cette section, nous visons à répondre aux deux questions suivantes :

1. Quels sont les concepts utilisés pour définir un système d'information, leur typologie et leurs caractéristiques ?
2. Comment interprétons-nous l'usage des SI et quels sont leurs rôles dans le fonctionnement des entreprises ?

2.2.1 Qu'est-ce qu'un système d'information ?

Dans un contexte fortement automatisé, la capacité à disposer d'une information fonctionnelle et de qualité est un levier compétitif au sein des entreprises. La contribution des systèmes d'information à la création de la valeur dépend de la définition et du type du système d'information choisi. Cependant, la notion de système d'information demeure abstraite, et la définir n'est pas une tâche facile étant données les différentes définitions. Nous exposerons ici celles-ci afin de donner un sens plus proche de nos attentes. Selon le point de vue, nous pouvons définir le système d'information sous un angle *technique*, *social* ou *sociotechnique*.

Une définition *technique* est proposée par (Laudon, et al., 2010) où le système d'information est considéré comme « *un ensemble de composantes inter-reliées qui recueillent de l'information, la traitent, la stockent et la diffusent afin d'aider à la prise de décision, à la coordination et au contrôle au sein de l'organisation* ». Avec cette définition, en plus de sa forme informatisée (usage des technologies

informatiques / matériels, et des logiciels), le système d'information peut aussi avoir une forme manuelle (utilisation des supports papiers, etc.) ou parallèle (partie informelle, communication orale / bouche à oreille, etc.). **Dans le contexte de notre étude, nous nous intéressons au système d'information informatisé.**

Une définition *sociale* du système d'information est proposée par (Roux, 2004) : « *Ensemble organisé de ressources : matériel, logiciel, personnel, données, procédures... permettant d'acquérir, de traiter, de stocker des informations (sous forme de donnée, textes, images, sons, etc.) dans et entre des organisations* ». Selon lui, il ne faut pas limiter le système d'information à un système informatique : il englobe tout système qui permet de collecter, mémoriser, et traiter l'information. En effet, pour (Roux, 2004), le but d'un système d'information est d'« *apporter un soutien aux processus de travail dans l'organisation selon trois modalités principales : fournir de l'information, assister le travail humain et automatiser le travail* ».

Une définition *sociotechnique* du système d'information est proposée par (Reix & Rowe, 2002) : « *ensemble d'acteurs sociaux qui mémorisent et transforment des représentations via des technologies de l'information et des modes opératoires* ». Cette définition identifie une dimension sociale, une dimension organisationnelle (par la mémorisation et la transformation des représentations) et une dimension matérielle (par l'usage des technologies de l'information).

Egalement, nous pouvons aborder les définitions des systèmes d'information sous différentes approches : *systémique, fonctionnelle, et structurelle*.

Concernant l'approche *systémique*, (Le Moigne, 1977) considère le système d'information comme un système vivant et réalisant des objectifs à part entière : c'est un système qui englobe tous les composants dont les interactions sont de type informationnel. Ainsi, (Le Moigne, 1977) propose un « découpage » de l'organisation entre (i) un système opérant (transformation des ressources et des flux), et (ii) un système de pilotage (prise de décision, définition des objectifs, etc.). Le système d'information relie les deux systèmes précédents en collectant, traitant, stockant et diffusant l'information.

(Bernus & Nemes, 1996) proposent une approche *fonctionnelle* où ils considèrent qu'un système d'information « *doit garantir que la bonne information est disponible au bon endroit et au bon moment* ». La valeur ajoutée du système d'information dans l'entreprise est de permettre aux acteurs de travailler ensemble d'une façon coordonnée.

Une approche *structurelle* définit le système d'information en distinguant deux sous-systèmes (Morley, 2002) (Morley, et al., 2005) : le système de traitement de l'information (comprenant les acteurs, les données, et les processus), et le système informatique (comprenant les ressources matérielles et logicielles, les bases de données et les fonctions).

Ces différentes définitions contribuent à mieux comprendre le concept de système d'information. La définition *sociotechnique* permet de « sortir » du cadre purement technique en soulignant la dimension organisationnelle et matérielle. L'approche *systémique* du système d'information trace des limitations claires entre les parties *opérationnelle, informationnelle* et

décisionnelle dans l'entreprise. L'approche *fonctionnelle* situe le système d'information par rapport aux fonctions rendues / attendues autour de l'information dans l'entreprise. L'approche *structurelle*, en complément de la définition *sociotechnique*, sépare le système de traitement de l'information du système informatique. Cette vision est intéressante pour le cadre de notre étude, car elle permet de mettre en avant le système de traitement de l'information autour des *acteurs*, des *données*, et des *processus*. En effet, la notion de *processus* est essentielle vu qu'il décrit quand, comment, et où les acteurs de l'organisation utilisent les informations pour atteindre les objectifs de l'organisation. Ainsi, le système d'information dépasse le stade d'outil pour la gestion de l'information et devient un élément structurant de l'organisation (Morley, et al., 2005), ce qui est encore vrai dans un contexte de forte automatisation. Dans le reste de notre manuscrit, nous adopterons l'approche *structurelle* du système d'information afin de mettre l'accent sur **l'évolution de ses données et des processus par rapport à l'organisation**. Aussi, l'approche *structurelle* du système d'information offre un découpage de ses fonctions qui facilite la maîtrise de sa complexité (découper pour mieux comprendre). **Ainsi, nous visons à définir le moyen de permettre l'évolution du système d'information au travers de sa structure de données pour atteindre et maintenir l'alignement avec les besoins opérationnels.**

Dans un contexte où les métiers ne cessent d'évoluer et de gagner en complexité, et particulièrement dans un environnement incertain comme l'industrie des semi-conducteurs, les systèmes d'information sont « challengés » pour s'adapter selon les besoins des métiers. Ce challenge est encore plus difficile, car l'aspect dynamique de l'évolution des besoins ajoute une couche de complexité pour gérer cette évolution, à la complexité déjà inhérente à la réalisation des métiers. Dans ces conditions, comment le système d'information doit se comporter pour remplir ses fonctions ? Et quels attributs devrait-il posséder ?

2.2.2 Adaptabilité du système d'information

Face aux évolutions fréquentes qui caractérisent les métiers en particulier ceux de l'industrie des semi-conducteurs, les systèmes d'information doivent disposer d'une capacité à suivre ces changements ; nous parlerons de SI flexibles. La *flexibilité* est associée à la capacité à intégrer des variabilités dans un cadre déjà déterminé ; elle est proactive et permet au système d'information de s'adapter tant que les modifications à apporter sont connues et pensées à l'avance : La prise en compte de cette « variabilité » est anticipée dès les phases de conception du système initial ou des solutions futures.

Pour (Chelli, 2003), la *flexibilité* offre l'aptitude d'un système à évoluer facilement pour s'adapter aux contextes. Pour les systèmes d'information, (Chelli, 2003) distingue quatre niveaux de *flexibilité*. Le premier niveau est la *flexibilité technologique* qui se traduit par l'usage des langages et outils informatiques déjà présents sur le marché offrant une adaptation rapide du système informatique. Le deuxième niveau est la *flexibilité structurelle* qui se traduit par l'utilisation de standards adaptables. Les progiciels de gestion intégré (de type ERP, CMMS, etc.) offrent les principales fonctions indispensables pour la gestion des flux et des procédures de l'entreprise. La généricité de ces outils favorise leur flexibilité, même si elle est fortement conditionnée par des considérations techniques. Le troisième niveau est la *flexibilité potentielle* qui prend en compte les considérations de la réalité opérationnelle. Il

s'agit de prévoir des fonctionnalités complémentaires qui pourront être utilisées au besoin. Le quatrième niveau est la *flexibilité topographique* qui permet de projeter les impacts des évolutions organisationnelles sur le système d'information. Ce dernier type de flexibilité s'inscrit dans les démarches de gouvernance du système d'information.

La notion de *flexibilité potentielle* permet de faire la distinction avec la notion de flexibilité proactive : la nuance réside dans la prise en compte de potentielles évolutions des métiers. Ainsi, la *flexibilité potentielle* se rapproche de la notion d'*agilité*. S'inscrivant dans une dynamique de transformation, l'agilité donne au système d'information la capacité à gérer les imprévus (posture réactive). En effet, (Canter, 2000) considère la flexibilité comme une réponse à des situations de risques connus, alors que l'agilité permet de répondre à des changements imprévus. De même, la transformation, portée par l'agilité, est généralement créatrice de valeur. (Barzi, 2007) associe l'agilité aux propriétés de réactivité et d'adaptabilité. Bien que (Chelli, 2003) considère la flexibilité des systèmes d'information comme le reflet de l'agilité des organisations, nous proposons dans le cadre de nos travaux de considérer une agilité propre au système d'information. Il ne s'agit pas de l'agilité technologique du SI ou sur les méthodes de son développement, mais **d'une propriété de comportement du système d'information (SI)** ! La vertu d'agilité recherchée de fonctionnement des SI est devenue une exigence forte pour répondre à des processus métiers agiles. Ces derniers sont devenus de plus en plus automatisés et informatisés, particulièrement dans l'industrie des semi-conducteurs, et nécessitent ainsi des SI permettant le pilotage et l'exécution des processus. Pour les SI, la notion d'agilité « usuellement » traitée portait sur les techniques de développement informatique, où l'originalité consistait dans la livraison itérative de la solution cible, confrontée à chaque livraison à l'évaluation des clients. Ainsi, c'est une agilité sur comment « déployer » l'agilité par du « code ». Pour nous, l'originalité de la notion d'agilité des SI que nous préconisons et proposons au niveau de son fonctionnement, consiste dans l'adaptabilité du SI en entier pour prendre en compte les besoins métier continuellement évolutifs. De cette façon, l'agilité des méthodes de développement informatique n'est qu'un outil d'implémentation technique au service d'une agilité plus globale. Nous cherchons à atteindre cette agilité globale du SI au niveau de son fonctionnement par (i) une capacité à refléter les évolutions fonctionnelles des métiers, (ii) à pouvoir interagir dynamiquement à la fois avec les métiers et l'aspect technique du développement informatique, et (iii) à assurer une continue évolution des métiers et des SI (sans saturation ni blocage).

Le défi de passer de SI flexibles à des SI agiles n'est que le reflet de l'exigence à suivre l'évolution des organisations (qui sont passées de la posture flexible à agile). Ainsi, la réflexion demeure la même : comment disposer de SI à l'image des organisations ? Autrement dit, comment disposer de SI alignés sur l'organisation ? Nous aborderons cette question dans la section suivante.

2.3 L'alignement Métier / IT

2.3.1 Le concept d'alignement

L'évolution de la place des Technologies de l'Information (IT) dans les entreprises depuis les années 70 a fait émerger la nécessité d'une vision cohérente entre la perspective organisationnelle et

métier d'une part, et la vision IT d'autre part. Cela se traduit par la capacité des systèmes d'information à suivre et à s'adapter aux évolutions des organisations et aux contraintes de leur environnement. Ces ajustements dynamiques font partie des problématiques traitées par l'alignement des systèmes d'information. L'intérêt de l'alignement ne date pas d'aujourd'hui (Silvius, 2009) et est largement reconnu : les sondages réalisés par (Weill & Broadbent, 1998) (Kearns & Lederer, 2003) auprès des responsables informatiques placent l'alignement des SI parmi les 10 sujets en IT les plus importants pour l'industrie. En plus de la maximisation du retour sur investissement en IT (Porter, 1987), l'alignement des systèmes d'informations permet d'obtenir des avantages concurrentiels (Papp, 2001) (Luftman, 1996) en facilitant le développement du plan d'entreprise et en exploitant les IT comme moyen d'amélioration. Aussi, l'alignement apporte un gain en flexibilité afin de mieux réagir aux nouveaux événements : (Lederer & Mendelow, 1989) affirment que l'alignement permet de développer des systèmes d'information rendant flexible le fonctionnement de l'organisation et améliorant sa capacité de réaction.

Malgré la reconnaissance de l'intérêt de l'alignement, sa mise en œuvre demeure délicate (Mamoghli, et al., 2015). Peu de responsables d'entreprises jugent que les systèmes et processus de leur organisation sont alignés (Renner, et al., 2003). (Salinesi & Rolland, 2003) considèrent la principale difficulté par l'utilisation de langages à différents niveaux d'abstraction et de documents différents pour modéliser les systèmes et les processus. (Luftman, 2004) identifie les causes principales par l'absence de la maîtrise du concept d'alignement au sein des organisations, et par l'absence d'une communication / compréhension entre la vision Métier et la vision Technologies de l'Information. Nous remarquons d'ailleurs l'utilisation de plusieurs terminologies pour traduire le concept d'alignement (traduisant la difficulté à poser une définition claire pour l'alignement) : nous retrouvons des termes tels que *fitness relationship* (Potts, 1997), *matching*, *alignement* (Wegmann, et al., 2005), *pont* (Ciborra, 1997), *harmonie* (Luftman, 1996), *lien* (Henderson & Venkatraman, 1993), *correspondance* (Knoll & Jarvenpaa, 1994), *congruence* (Bergeron, et al., 1999).

L'alignement / désalignement d'un système d'information peut être évalué à plusieurs niveaux. Par exemple l'infrastructure matérielle n'est plus en mesure de supporter les nouveaux applicatifs, ou certaines fonctions ne sont plus prises en compte par le système informatique. Sur un autre niveau, l'évolution de certains processus n'est plus supportée dans les systèmes d'information. Nous pouvons également considérer le cas où les objectifs de la stratégie de l'entreprise ne sont pas pris en charge par les processus, etc. Cependant, dans l'état actuel des recherches sur l'alignement, il demeure difficile de constater a priori, à un instant précis, si les processus et les systèmes d'information sont alignés. Bien que l'évaluation de cet état constitue un indicateur pertinent comme critère de décision pour définir les stratégies / solutions cibles futures (en favorisant des critères de flexibilité, en minimisant les coûts, etc.).

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons à l'alignement entre deux entités : un processus d'entreprise et un système d'information dans un contexte complexe et dynamique. Afin de structurer notre analyse, nous proposons de nous baser sur les concepts proposés dans le Modèle d'Alignement Stratégique (*Strategic Alignment Model – SAM*) de (Henderson & Venkatraman, 1993). En effet, les technologies de l'information sont considérées comme un moyen de supporter opérationnellement les besoins des parties prenantes pour accomplir les activités opérationnelles de

l'organisation, afin d'atteindre les objectifs de l'organisation. Nous détaillons le SAM dans la section suivante.

2.3.2 Description du *Strategic Alignment Model (SAM)*

Le Modèle d'Alignement Stratégique de (Henderson & Venkatraman, 1993) s'intéresse à l'intégration des technologies de l'information dans la stratégie d'entreprise en recommandant l'alignement entre quatre domaines : (i) la stratégie d'entreprise, (ii) la stratégie des technologies de l'information (IT), (iii) l'infrastructure et les processus organisationnels, et (iv) l'infrastructure et les processus techniques. La Figure 2.1 permet d'illustrer ce modèle.

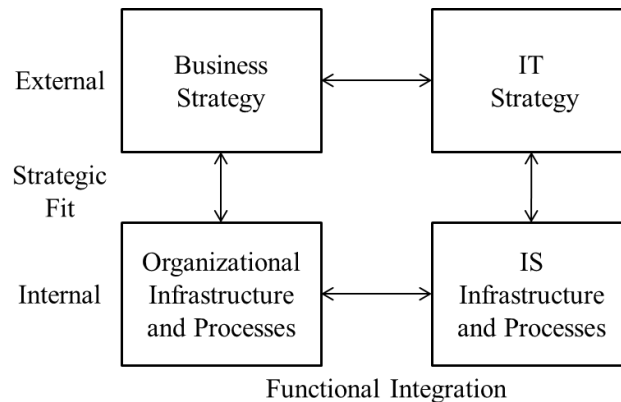


Figure 2.1 : *Modèle d'Alignement Stratégique de* (Henderson & Venkatraman, 1993)

La stratégie d'entreprise et la stratégie IT sont dites externes : elles font référence à la position d'une organisation par rapport à ses concurrents en termes de produits, de marchés, de partenaires, etc. Le domaine interne spécifie la structure de l'organisation (métier ou IT) par ses processus, départements, et compétences. L'alignement inter-domaines est défini selon deux axes : (i) *l'alignement stratégique* entre le domaine interne et le domaine externe et (ii) *l'intégration fonctionnelle* entre le domaine d'entreprise et le domaine des technologies de l'information. Nous nous intéressons au développement des domaines internes, comme détaillé en Figure 2.2.

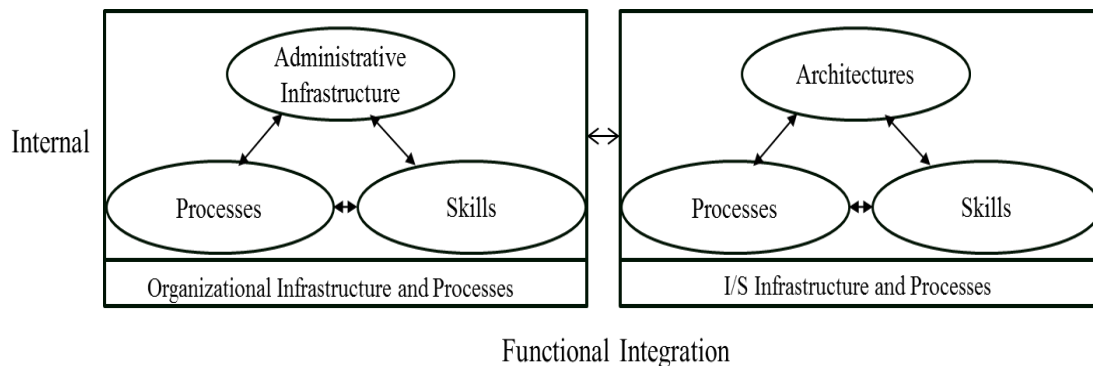


Figure 2.2 : *Structures internes du Modèle d'Alignement Stratégique de* (Henderson & Venkatraman, 1993)

Au niveau interne, la *structure organisationnelle et processus* couvre :

- La structure administrative : elle permet de définir la structure d'entreprise, les responsabilités, ainsi que les décisions relatives à la définition des rôles.
- Les processus organisationnels : ils définissent le comment pour la réalisation des activités et fonctions de l'entreprise.
- Les compétences : elles définissent les décisions relatives à l'acquisition / formation et au développement de compétences par les ressources humaines afin de réaliser les activités de l'entreprise.

Au niveau interne des TI, l'infrastructure technologique et processus du SI est également structurée par trois composantes :

- L'architecture technique du SI : elle est définie par le modèle de données, le portefeuille d'applications / logiciels, et le matériel utilisé (hardware).
- Le processus du système d'information (SI) : ils définissent les pratiques et activités de conception, d'évolution, de surveillance et de maintenance du SI.
- Les compétences technologiques : elles concernent l'acquisition et le développement de compétences individuelles nécessaires pour la bonne gestion des SI et de son infrastructure.

Les principaux apports du SAM résident dans la désignation explicite du rôle important du SI, qui prend une dimension stratégique, et la nécessité d'aligner la stratégie et la structure (autant pour la stratégie d'entreprise que pour la stratégie du SI). **Aussi, le SAM doit être compris dans une perspective dynamique où (i) les types de domaines ne doivent pas être déconnectés et où (ii) l'influence mutuelle de la stratégie / structure doit être prise en compte.** Ainsi, (Henderson & Venkatraman, 1993) introduisent la notion de *perspective* ou de *séquence d'alignement* : ils soutiennent que l'application d'une seule brique d'alignement n'est pas suffisante (ajustement stratégique ou intégration fonctionnelle) pour aligner efficacement une organisation et son SI. Il est nécessaire d'enchaîner ces briques de différentes manières pour aligner les domaines. En effet, une séquence d'alignement peut se traduire par une ligne passant par trois des quatre quadrants / domaines du SAM. Notons qu'il existe plusieurs *séquences d'alignement* qui dépendent du secteur d'activité de l'entreprise, de sa structure, et de la façon dont elle vise à réagir avec son environnement (par exemple, la transformation technologique). À titre d'exemple, nous présentons la séquence d'alignement la plus courante et la plus largement utilisée : l'exécution de la stratégie d'entreprise, comme l'illustre la Figure 2.3. Elle correspond à la vision classique et hiérarchique de l'alignement stratégique.

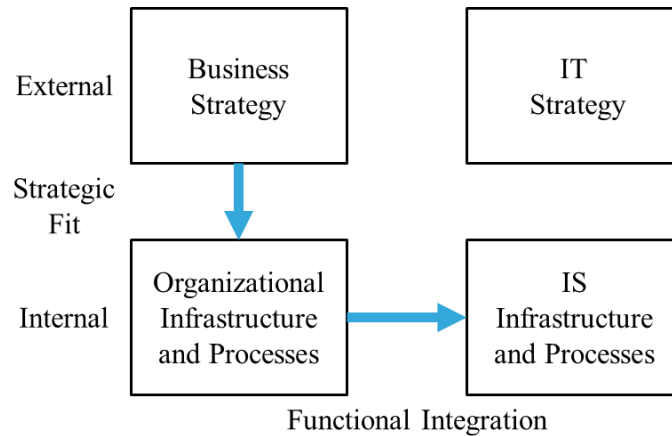


Figure 2.3 : Séquence d'alignement « Exécution de la stratégie d'entreprise »

Dans la séquence d'alignement d'*exécution de la stratégie d'entreprise*, les trois domaines impliqués sont : la stratégie d'entreprise, la structure organisationnelle et processus, et l'infrastructure technologique et les processus des SI. Pour la mise en place de la stratégie d'entreprise, la structure organisationnelle et processus sont revus / reconçus (ajustement stratégique). Par l'intégration fonctionnelle, la structure organisationnelle est transposée en *infrastructure technologique et processus des SI* (par la définition de l'architecture cible du SI). Par exemple, une entreprise formule une nouvelle stratégie qui consiste à diversifier son offre de produits. Cela va impliquer la refonte des processus de production, de contrôle des procédés de fabrication, la restructuration des processus d'approvisionnement, etc., afin de répondre aux nouveaux besoins générés par le nombre important de références à produire. Cela implique aussi de définir un plan de formation pour acquérir les compétences nécessaires pour gérer la complexité de la nouvelle situation, et de modifier la structure administrative (nouveaux départements, management plus transversal, fusion de services, etc.). Dans ce cadre, l'adaptation des niveaux internes des technologies de l'information, par la modification de l'architecture du SI (nouveaux objets métiers, intégration de nouveaux applicatifs, interopérabilité des SI, etc.) peut être nécessaire afin de supporter les nouveaux processus et la nouvelle structure administrative.

Comme indiqué à la fin de la section 2.3.1, nous rappelons que, dans le cadre de notre étude, nous visons à atteindre un alignement au niveau interne, par une intégration fonctionnelle entre les domaines Métier et IT dans un environnement complexe et dynamique. A cet effet, nous aborderons dans ce qui suit les liens entre flexibilité, agilité, et alignement.

2.3.3 Flexibilité, agilité et alignement

Avec l'automatisation croissante et l'importance que prend la composante informatique, particulièrement dans l'industrie des semi-conducteurs, l'entreprise devient dépendante de son SI. Face aux évolutions dynamiques de l'organisation et la complexité de ses métiers, l'alignement se trouve confronté aux mêmes difficultés. Le challenge pour les SI est d'être à l'image des métiers dans une posture à la fois flexible et agile. Ces propriétés ne peuvent que contribuer à l'alignement.

Nous soulignons les difficultés de gérer des systèmes flexibles et agiles en même temps. Plus un système est flexible, plus il est complexe, et donc coûteux⁵ (Canter, 2000) (Martensson, 2007). Aussi, bien que la flexibilité soit un paramètre contribuant à l'agilité (un système agile est forcément flexible), un système « trop » flexible perd en agilité (en considérant l'agilité comme l'aptitude à répondre à des changements imprévus). Ainsi, nous nous retrouvons dans une situation de dilemme où une forte flexibilité, signifiant une forte complexité, engendre une perte en agilité (Martensson, 2007), comme illustré dans la Figure 2.4. Ainsi, nous devons viser un alignement qui peut autant intégrer des actions proactives, pour gagner en flexibilité, que des actions réactives, pour gagner en agilité.

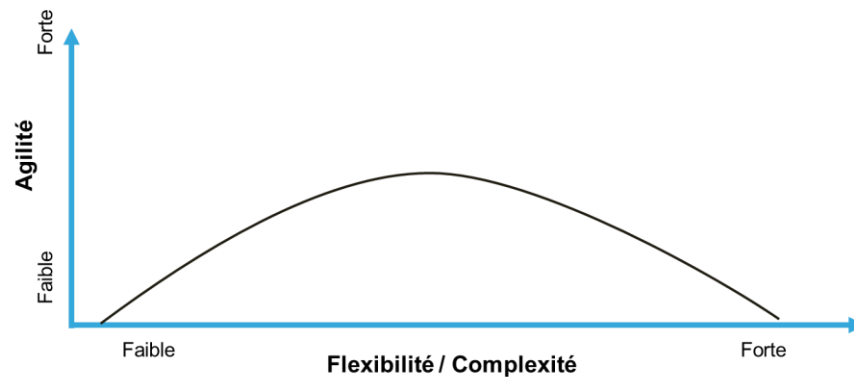


Figure 2.4 : Lien entre la flexibilité et l'agilité (Martensson, 2007)

Bien qu'il s'agisse d'une représentation qualitative, dans la figure 2.4, la flexibilité ne permet pas de gagner indéfiniment en agilité. Au-delà du point d'inflexion, le système perd en agilité. Une flexibilité encore plus importante dégrade l'agilité, d'où l'absence d'une asymptote horizontale au niveau du point d'inflexion. En effet, le système se trouve avec une complexité importante (associée à celle de la flexibilité) qui tend à annuler toute marge d'agilité. Nous proposons de compléter la Figure 2.4 en rajoutant les contraintes de temps et de coût. La Figure 2.5 schématise notre proposition.

⁵ Nous proposons également de prendre en compte le paramètre du temps car l'agilité est associée à une réponse rapide. Aussi, l'agilité doit apporter une réduction des coûts.

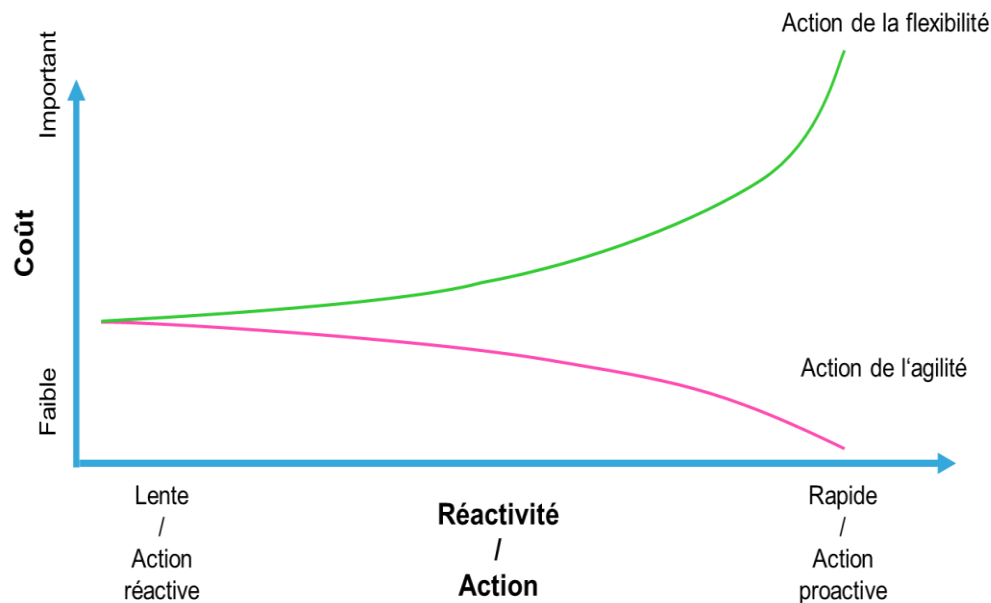


Figure 2.5 : Coûts de la flexibilité et de l'agilité en fonction du degré de réactivité et de la nature des actions

La Figure 2.5 illustre les coûts de la flexibilité et de l'agilité en fonction du degré de réactivité et de la nature des événements (planifiés ou imprévus) à gérer. En considérant les coûts, nous remarquons qu'un système flexible est adapté pour gérer les événements planifiés nécessitant des actions proactives. Dès que nous abordons la gestion d'événements imprévus (nécessitant une posture réactive), l'action de la flexibilité se trouve limitée et engendre d'importants coûts. L'action de l'agilité est la plus appropriée car elle offre des réponses rapides, pour des événements non planifiés, tout en réduisant les coûts !

Le fonctionnement du SI est souvent déconnecté des événements déclencheurs du changement. Confronté au défi de l'alignement, il faut trouver le juste équilibre pour un système qui soit suffisamment flexible pour permettre l'agilité, tout en maîtrisant les coûts : il est important de doter le SI d'une capacité de flexibilité et d'agilité. Le défi est aussi de pouvoir préserver / maintenir l'alignement face aux évolutions fréquentes.

Nous analyserons dans ce qui suit les démarches d'alignement existantes, en se focalisant sur celles qui permettent un alignement au niveau interne, par une intégration fonctionnelle, entre les domaines Métier et IT, dans un environnement complexe et dynamique.

2.3.4 Les démarches d'alignement et leurs limites

2.3.4.1 Synthèse / applicabilité des démarches d'alignement

Il n'existe pas de consensus sur la définition ou l'usage de l'alignement des SI. Les termes *d'alignement stratégique*, *alignement Métier / TI* sont indifféremment utilisés soit pour décrire

l'alignement *interne* soit l'ensemble des points de vue de l'alignement. Ceci rend difficile la bonne compréhension des objectifs et les contributions des travaux dans ce domaine. La multitude et la variété des approches d'alignement, associée à la « non clarté » des objectifs, font que la comparaison de ces approches en langages naturels est peu évidente. A cet effet, (Avila, et al., 2009) proposent un niveau d'abstraction plus élevé, en se basant sur le SAM, afin de comparer les différentes approches d'alignement et de pouvoir les formaliser au niveau des concepts d'alignement. Ils ont proposé une grille d'analyse des approches d'alignement qui prend en compte :

- *Les domaines impliqués* : il s'agit d'identifier les domaines à aligner par rapport au domaine des SI.
- *La séquence d'alignement* : il s'agit d'identifier la séquence d'alignement correspondante.
- *La capacité à scruter l'environnement* : il s'agit de définir les éléments impactant de l'environnement dans les approches d'alignement analysées (Camponovo & Pigneur, 2004).
- *La dimension temporelle* : l'alignement avec les évolutions vise à assurer que le SI puisse évoluer conformément aux changements de l'organisation et de son environnement.

La plupart des travaux considère l'alignement comme la mise en cohérence entre les domaines de l'organisation (et de son environnement) et des technologies de l'information. De ce fait, l'alignement vise à l'analyse de ces domaines et à définir comment conduire leur alignement (selon quelle séquence d'alignement ? quelle finalité ? etc.). Ainsi, au premier abord, l'analyse des contributions existantes montre que l'alignement des SI traite principalement de ces questions : (i) quels domaines aligner par rapport au SI (et vice-versa) (où un ensemble de strates / couches représente les domaines de l'organisation) ? et (ii) quelle sera la séquence d'alignement correspondante ? Les approches sont (Avila, et al., 2009) :

- **BITAM** (*Business IT Alignment Method*) (Chen, et al., 2005) : BITAM définit trois couches décrivant un système d'entreprise : le modèle d'entreprise, l'architecture d'entreprise et l'architecture des technologies de l'information. Cette méthode traite l'alignement des SI par la notion de désalignement : elle consiste à contrôler, détecter et corriger les désalignements Business/architecture des SI entre les trois couches.
- **MIT90s Model** (Scott-Morton, 1991) : ce modèle représente l'organisation en cinq forces internes sujettes aux variations environnementales; c'est un cadre pour la gestion du changement dans les organisations. Il se base sur le principe selon lequel le succès de l'alignement réside dans la corrélation entre l'environnement externe, la stratégie de l'organisation, la structure de l'organisation, la gestion de processus, la technologie employée, les compétences et rôles des individus. Bien que ce modèle soit dépassé, son intérêt réside dans la proposition d'une représentation simple des organisations.
- **Fujitsu Framework** (Yetton, et al., 1994) : il a été construit sur la base du modèle MIT90s. Cette méthode place la technologie au centre de l'alignement : la transformation organisationnelle se produit par l'adoption progressive des technologies de l'information.
- **Urbanisme des SI** (Approche de Longépé) (Longépé, 2004) : Longépé définit l'urbanisme des SI comme « *un moyen pour sauvegarder la cohérence et améliorer l'efficacité du système d'information c'est-à-dire la qualité de sa contribution à l'atteinte des objectifs de l'entreprise* ». Le système d'entreprise est structurée en quatre couches : la couche métier, la couche fonctionnelle, la couche applicative, et la couche technique. Cette approche vise à rendre le SI le plus réactif possible.

- **B-SCP** (*Business Strategy, Context, and Process*) (Bleistein, et al., 2006) : C'est une approche d'ingénierie des besoins. Elle vise à permettre la validation des besoins en phase amont de la conception des SI afin d'assurer l'alignement avec la stratégie, le contexte, et les processus de l'organisation. Un cadre d'alignement est proposé prenant en compte les éléments : la stratégie, le contexte des métiers, les processus organisationnels, et la description du SI.
- **BALES** (*binding Business Applications to LEgacy Systems*) (Papazoglou & Heuvel, 2000) : c'est une méthode qui se base sur la modélisation des applications métiers à l'aide d'un cadre d'intégration d'entreprise. Cela permet de lier les modèles métiers / modèles d'entreprise aux modèles d'application et aux SI. Le cadre se compose de cinq niveaux : les buts stratégiques et politiques organisationnelles, les objets métiers, les processus métier, les workflow, et le SI d'entreprise.
- **ARIS** (*Architecture of Integrated Information System*) (Scheer & Nüttgens, 2000) : c'est une architecture générale des processus métier qui se base sur deux approches pour la reconfiguration des SI : (i) une approche « *content driven* » qui permet de développer et d'implémenter un système organisationnel fonctionnel, et (ii) une approche « *formal driven* » qui vise à développer et à implémenter un système technique. L'application d'ARIS va de la re-conception des processus métier, à la conception et au déploiement IT, ayant une conception logicielle orientée processus. Pour parvenir à cet objectif, quatre niveaux architecturaux sont proposés : ingénierie des processus, planification et contrôle des processus, contrôle / maîtrise du workflow, et le système d'application.
- **Approche de Wieringa** (Wieringa, et al., 2003) : c'est un cadre d'analyse pour la conception des processus métier et de l'architecture du SI. Dans ce cadre, le Business et ses applications logicielles support forment un système réactif, c'est-à-dire un système qui répond aux événements de l'environnement. Cette approche prend en compte trois univers différents, à savoir l'univers physique, l'univers linguistique et l'univers social, afin de réaliser l'alignement du contexte du Business avec l'architecture du SI.
- **SEAM** (*Systemic Enterprise Architecture Methodology*) (Wegmann, et al., 2002) : c'est une méthode d'architecture d'entreprise qui vise à aligner les processus métiers et les SI supports. Le modèle proposé permet de représenter les ressources disponibles au sein d'une entreprise et de son environnement, ainsi que les processus auxquels ces ressources participent. Quatre niveaux organisationnels sont proposés : le niveau business, le niveau entreprise, le niveau opération, et le niveau technologique. Chaque niveau permet de décrire la situation de départ (*As-Is*) ou ce qui devrait exister (*Next-Step*) par l'utilisation des techniques de modélisation.

Afin de se positionner par rapport aux approches citées ci-dessus, nous rappelons que dans le cadre de notre étude, nous visons à atteindre un alignement au niveau interne, par une intégration fonctionnelle, entre les domaines Métier et IT, dans un environnement complexe et dynamique. Nous donnons une considération particulière aux fréquentes évolutions des besoins des métiers et leur nature répétitive. Aussi, nous soulignons la nature non planifiée des évolutions qui conditionnent la façon d'appréhender le changement (action réactive, davantage d'agilité, etc.). Ainsi, nous proposons une nouvelle classification des approches analysées dans (Avila, et al., 2009) en les confrontant aux critères de la fréquence et nature du changement. La figure 2.6 schématise notre classification.

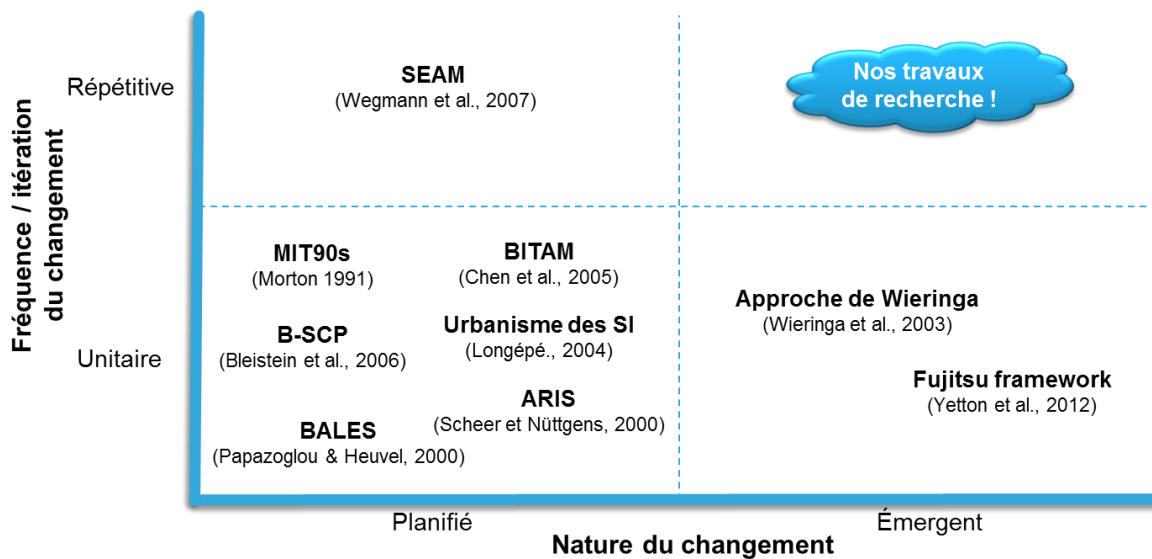


Figure 2.6 : Positionnement de nos travaux de recherches

Nous remarquons, dans la Figure 2.6, que la majorité des démarches d'alignement (parmi celles analysées dans (Avila, et al., 2009)) sont conçues pour des changements planifiés avec des évolutions à itération unitaire. Seule la méthode SEAM propose de décrire et de prendre en compte les états futurs et de réduire les écarts avec l'existant. Cependant, cette méthode n'est pas recommandée pour les environnements techniques (conception, production, etc.) surtout en ce qui concerne la veille technologique. En effet, SEAM n'est pas adaptée pour gérer des événements non planifiés. Aussi, la variété et la diversité des points de vue / objectifs des utilisateurs des SI rendent difficile la définition d'une vision unifiée et pertinente des évolutions. Or, le SEAM ne propose pas de moyens pour valider ces évolutions auprès des utilisateurs. C'est l'approche de Longépé (Longépé, 2004) qui permet de décrire les besoins des utilisateurs pour l'usage des SI : les principales fonctions sont schématisées par des diagrammes UML de cas d'utilisation. Cet aspect contribue à prendre en compte la variété des usages des SI. Cependant, la démarche demeure lourde et longue à mettre en place. Pour la prise en compte de besoins non planifiés, l'approche de Wieringa (Wieringa, et al., 2003) et le Fujitsu Framework (Yetton, et al., 1994) paraissent les mieux adaptés car ils sont respectivement à l'écoute de l'environnement et prennent en compte les évolutions des SI pour les transformations organisationnelles. Cependant, ces approches ne prennent pas en compte la nature répétitive du changement. En effet, ces approches traitent généralement le changement comme un processus faiblement cyclique, où le projet de transformation dure dans le temps (moyenne de trois ans). Le risque est de mal gérer la nature répétitive du changement et son impact sur la façon d'interpréter les besoins des utilisateurs (risque d'être conditionnés par le volet IT). Autrement dit, ces approches auraient besoin d'être plus proches des considérations opérationnelles. Enfin, soulignons que la classification que nous proposons dans la figure 2.6 ne représente pas les perspectives d'alignement. Nous complétons notre classification par la répartition suivante (Avila, et al., 2009) :

- Approches traitant de l'exécution de la *stratégie d'entreprise* (ou de la stratégie concurrentielle) : MIT90s, Urbanisme des SI, B-SCP et BALES.

- Approches traitant l'intégration fonctionnelle entre le domaine *structure organisationnelle et processus* et celui de *l'infrastructure technologique et processus du SI* : ARIS et Wieringa.
- Approches suivant des chemins d'alignement alternatifs : BITAM, Fujitsu Framework et SEAM.

Aujourd'hui, le SAM est devenu un outil de gestion dont la finalité est que le SI soit un atout de différenciation et de compétitivité pour les entreprises. Il a inspiré de nombreux modèles (Avila, et al., 2009) et pratiques des cabinets de conseils (naissance chez IBM). Nous détaillons dans ce qui suit les limites d'application de ces démarches pour l'alignement au niveau interne, par une intégration fonctionnelle, entre les domaines Métier et IT, **dans un environnement complexe et dynamique**.

2.3.4.2 Limitations des approches d'alignement

Généralement, le cycle de vie des technologies de l'information est différent de celui des infrastructures métiers (outils de production, moyens de contrôle, etc.). Les SI sont renouvelés plus souvent et permettent ainsi de rattraper les désalignements pour chaque mise à jour. Cependant, une des particularités des environnements complexes et dynamiques, en particulier l'industrie des semi-conducteurs, est la différence des rythmes d'évolution entre les infrastructures métiers et les SI. Cela se traduit par un rythme d'évolution des besoins plus rapide que le rythme de mise en place des solutions informatiques correspondantes. Ce postulat conditionne la façon d'appréhender l'alignement où nous risquons de rencontrer des situations où les solutions livrées seront déjà obsolètes face à de nouveaux besoins. Ce constat est accentué par l'intensité et la répétition des changements à mettre en place. Il ne s'agit pas d'une évolution unitaire (par exemple sur un cycle moyen de trois ans pour la gouvernance des SI) mais d'évolutions répétitives. Le changement doit être intégré comme propriété au fonctionnement même des Métiers et des SI.

Aussi, à cause des développements incertains et rapides des pistes d'évolution des métiers, les prévisions des changements deviennent difficiles à mettre en œuvre. Imaginer un futur potentiel est entravé par la complexité et les « turbulences » de l'environnement. Même si les approches de prévision à base de scénarios paraissent comme la meilleure solution pour gérer ces cas de figure, la multitude des choix de développement n'aident pas à définir une vision claire. Néanmoins, nous préconisons la mise en œuvre de cette attitude exploratrice pour la définition de nouveaux scénarios. En effet, l'alignement du SI avec les évolutions incertaines vise à prévoir ou estimer les évolutions potentielles de l'organisation et de son environnement. Ce fait accentue la nécessité d'implémenter des SI évolutifs de manière à faire face aux changements potentiels à travers le temps (particulièrement vrai pour des entreprises confrontées à des environnements incertains et en évolution rapide et répétitive).

Une autre contrainte pour la mise en œuvre de l'alignement dans un environnement complexe et dynamique est le manque de compréhension partagée / commune et de communication entre *l'univers Métier* et *l'univers des technologies de l'information* (Chang, et al., 2008) (Redoli, et al., 2008). En effet, les managers en IT ont une idée précise de ce que les technologies de l'information sont capables de livrer comme solutions, mais ne sont pas nécessairement capables de développer un SI en cohérence avec l'ensemble des métiers. Aussi, la compréhension des organisations et la façon dont les activités sont réalisées paraissent intuitives pour les acteurs Métier : la difficulté réside dans la

conceptualisation de cette vision et de pouvoir la partager avec les équipes IT. Aussi, il est toujours difficile « d'interpréter » l'alignement si les praticiens ne s'approprient pas les modèles, au risque d'avoir une déconnexion avec les considérations terrains.

La compréhension de l'organisation (acteurs, métiers, processus, etc.) et de son articulation avec le monde des technologies de l'information est indispensable pour la mise en place de l'alignement. Ainsi, les principes de l'*Architecture d'Entreprise* permettent de mieux comprendre l'organisation pour la mise en place de l'alignement (Wang, et al., 2008). Nous détaillerons dans la section suivante l'*Architecture d'Entreprise* et ses liens avec l'alignement.

2.4 L'Architecture d'Entreprise

L'alignement Métier / IT fait partie de la gouvernance d'entreprise où l'architecture d'entreprise contribue à apporter une vision structurante, détaillée, rassemblant des visions différentes de l'entreprise, et surtout à identifier et à comprendre les liens qui existent entre les différents couches / vues modélisées. Le challenge réside dans l'aptitude à faire émerger une vision partagée de l'entreprise afin de tisser une cohérence, un alignement, et de pouvoir mener les projets de transformation.

Dans un contexte complexe et dynamique (fabrication des semi-conducteurs), comment l'architecture d'entreprise contribue à la mise en place de l'alignement ? Pour répondre à cette question, nous présenterons quelques généralités sur l'architecture d'entreprise afin de pouvoir aborder ensuite son lien avec l'alignement et l'agilité. Nous présenterons le concept de cadre de modélisation et nous terminerons en présentant les limitations de l'architecture d'entreprise.

2.4.1 Généralités sur l'architecture d'entreprise

Les entreprises évoluent désormais dans un cadre de plus en plus dynamique, avec le décuplement de la composante informatique au quotidien et à tous les niveaux (que ce soit au niveau opérationnel ou dans le management). De ce fait, et aidée par les nouveautés en IT, l'évolution des SI ne cesse de s'accélérer également. Le défi pour une entreprise est alors de définir / conduire l'évolution de son SI, et de ne pas être dans une posture de la subir : c'est le rôle de l'architecture d'entreprise ou EA (*Enterprise Architecture*). L'exercice de modélisation est au cœur de cette démarche, car cela permet une formalisation des connaissances d'une entreprise et d'explicitier les moyens / manières les supportant (Zachman, 1987) au travers de :

- **La description de l'organisation de l'entreprise et de ses objectifs.** Pour (Vernadat, 2006), les entreprises sont composées de ressources interdépendantes avec leurs finalités propres, organisées dans un processus (fonctionnel) lui-même lié à un comportement global (organisationnel) avec une finalité ou un objectif global (stratégique). Ainsi, nous soulignons la nécessité de la mise en cohérence / alignement entre ces ressources indépendantes, et de faire converger leurs finalités propres, qui risquent de ne pas être partagées : l'objectif global / stratégique permet de mutualiser ces ressources et de créer une synergie entre eux.
- **Les différentes modélisations de ses processus et de ses SI.** Ces modélisations doivent refléter le volet fonctionnel des processus métiers et des SI ainsi que le volet technique. (Le Moigne, 1977)

considère la modélisation comme « *une action d'élaboration et de construction intentionnelle, par composition de symboles, de modèles susceptibles de rendre intelligible un phénomène perçu complexe, et d'amplifier le raisonnement de l'acteur projetant une intervention délibérée au sein du phénomène ; raisonnement visant notamment à anticiper les conséquences de ces projets d'action possibles* ». La modélisation reflète ainsi l'usage de différents langages (pouvant être hétérogènes) dans le but d'explicitier / illustrer l'objet de la modélisation afin d'anticiper leur comportement suite à des actions possibles.

Ainsi, l'activité de modélisation en entreprise se consacre à la conception et à l'utilisation (simulation, étude de scénarios, formalisation et partage de la connaissance, etc.) de modèles de tout ou d'un périmètre donné de l'entreprise. (Vernadat, 1996) décrit la modélisation d'entreprise comme « *a generic term which covers the set of activities, methods, and tool related to developing models for various aspects of an enterprise* ». Au travers de cet exercice de modélisation, l'architecture d'entreprise mobilise la connaissance sur l'entreprise, sur les ontologies ou sur les langages de représentation adaptés dans une finalité d'alignement et d'aide à la décision pour les transformations à réaliser. Pour la gouvernance du SI, l'architecture d'entreprise est fondée sur la méthodologie suivante (Urba-EA, 2006) (d'une façon générale / macroscopique / l'essence de l'EA):

- **La description des ressources de l'entreprise en lien avec le SI.** Il s'agit de répertorier toutes les ressources humaines ou matérielles qui interagissent avec le fonctionnement du SI. Il s'agit d'une description / cartographie des ressources existantes, en vue de l'évolution future du SI. Pour la partie logicielle, les données sont au cœur du SI. Leur traitement permet de véhiculer l'information et de donner un sens aux objets métiers et à l'exécution des processus métiers. Il est ainsi primordial de définir l'application responsable de chaque donnée du SI (Urba-SI, 2003).
- **La définition de la cible pour l'architecture d'entreprise.** Le SI cible doit être en phase avec les objectifs stratégiques de l'entreprise. En effet, l'EA contribue à l'alignement stratégique du SI (Sessions, 2007), (Whittle & Myrick, 2004).
- **L'évolution du SI d'une situation existante à une situation conforme à la cible de l'architecture d'entreprise.** L'évolution du SI s'inscrit dans la transformation de l'organisation où l'entreprise doit disposer des ressources nécessaires à son fonctionnement. La migration du SI s'inscrit dans un projet stratégique où l'échéance couvre une vision de 3 à 4 ans.
- **La définition de l'architecture cible du SI et développement.** Il s'agit de prendre en compte l'architecture d'entreprise cible par la mise en œuvre de projets de développement. C'est la phase opérationnelle pour intégrer l'EA cible par la nouvelle architecture du SI.

L'architecture d'entreprise couvre des perceptions différentes de l'entreprise (fonctionnelle, technique, métier, IT, etc.) en cherchant à identifier et surtout comprendre les liens qui existent entre ces différentes vues. Cet effort nécessite l'intervention de plusieurs compétences avec un important travail de communication. Généralement, lors d'un projet d'EA, les rôles / acteurs requis sont :

- La maîtrise d'ouvrage MOA⁶ du projet de transformation / d'évolution de l'architecture d'entreprise. Le rôle est d'identifier et formaliser les besoins métiers de transformation. Il s'agit d'une étude fonctionnelle couvrant les nouveaux besoins par rapport à une situation existante.
- Le cartographe du SI. Le rôle est de cartographier la situation existante du SI. En tenant compte des nouveaux besoins fonctionnels, il joue également le rôle d'un architecte système pour le développement du SI cible.
- L'architecte d'entreprise. Ayant une double compétence technique et fonctionnelle, son rôle est d'assurer de la cohérence des différents points de vue de l'EA (stratégique, fonctionnelle, technique, etc.).
- La maîtrise d'œuvre. Le rôle est de décliner les spécifications fonctionnelles et de les intégrer dans le projet de développement du SI cible.

Grâce à une analyse et une description formalisée de ses aspects métiers et de son SI (IDS Scheer AG, 2005), l'EA offre une vision globale, structurée et partagée de l'entreprise, permettant ainsi un alignement avec le SI (Sessions, 2007) (Whittle & Myrick, 2004). Les défis (qui nous intéressent) résident dans la capacité à :

- Maîtriser l'organisation métier et sa complexité.
- Adapter rapidement le SI tenant compte de la complexité des métiers et la dynamique de leur évolution.

De cette façon, l'architecture d'entreprise peut être interprétée comme un outil pour l'alignement. Dans ce qui suit, nous aborderons les liens entre l'architecture d'entreprise, l'alignement, et l'agilité.

2.4.2 Lien Architecture d'entreprise – Alignement – Agilité

L'aboutissement de l'alignement Métier / IT constitue une validation d'une démarche d'architecture d'entreprise. Le concept d'architecture d'entreprise se résume à (i) une architecture Métier définie par les objectifs, la structure fonctionnelle, les informations et les processus de l'entreprise, et à (ii) une architecture Informatique couvrant les aspects architecture des données, d'applications et d'infrastructure (The Open Group, 2009). Ces différentes architectures sont aussi importantes les unes que les autres. Cependant, pour piloter une démarche d'architecture d'entreprise, une approche descendante est préconisée (Whittle & Myrick, 2004) (IDS Scheer AG, 2005), où l'architecture Métier prend une importance supplémentaire. En effet, l'architecture Métier permet de faire le lien entre la stratégie d'entreprise et son SI (Whittle & Myrick, 2004) : **nous parlons d'alignement !** L'intérêt ainsi pour l'alignement est d'optimiser les liens entre les différentes entités qui participent au bon fonctionnement de l'entreprise au travers d'un SI performant (répondant aux attentes des métiers) : l'architecture d'entreprise opère pour la représentation de ces liens (Métier / IT) et leur évolution (Jonkers, et al., 2006). Ainsi, l'architecture d'entreprise peut être considérée comme un moyen efficace pour atteindre l'alignement (Pereira & Sousa, 2005) (Wang, et al., 2008).

⁶ Nous parlons aussi d'assistance à la maîtrise d'ouvrage AMOA où un prestataire externe à l'entreprise intervient pour supporter l'analyse fonctionnelle des besoins de transformation.

En pratique, l'architecture d'entreprise favorise l'alignement par la réutilisation des éléments du SI satisfaisant l'architecture d'entreprise cible. Cela permet d'une part d'assurer une continuité de fonctionnement de l'environnement existant, et de diminuer les coûts de développement et de maintenance d'autre part. De même, la préconisation de l'architecture d'entreprise de cartographier le SI existant et la définition de la cible permet de faciliter la « migration fonctionnelle » et / ou la « migration technique » du SI. Aussi, cela permettra des choix technologiques des solutions IT cohérents avec les exigences techniques spécifiques à l'entreprise (volume des données, taille et nombre des transactions, fonctionnement en temps réel, etc.).

Visant un alignement agile, l'architecture d'entreprise doit apporter la réactivité requise pour répondre à des changements non planifiés, et prendre la juste mesure de la complexité des évolutions. L'architecte d'entreprise doit donc être impliquée dès le développement des problématiques métiers pour concevoir conjointement, avec le Métier, les vues métier, puis conjointement avec l'IT, les vues informatiques. L'architecture d'entreprise est reconnue aujourd'hui car elle a fait ses preuves dans plusieurs domaines. Elle est efficacement soutenue par des outils informatiques et des cadres méthodologiques. Comment pourrions-nous tirer profit des concepts d'architecture d'entreprise pour appuyer l'alignement agile ? Nous détaillerons dans le paragraphe suivant les différents cadres de modélisation d'entreprise.

2.4.3 Les différents cadres de modélisation d'entreprise

Un cadre de modélisation est une approche comportant un ensemble de modèles et de définitions formant un squelette modifiable (une sorte d'armoire de rangement) au domaine d'application de l'entreprise dans le but de développer et documenter les descriptions d'architectures (Martin, et al., 2004). Le cadre de modélisation est à différencier de l'architecture d'entreprise dans le sens où l'architecture décrit le fonctionnement et l'organisation de l'entreprise, alors que le cadre définit la mise en œuvre du SI et des processus métiers de l'entreprise. Une architecture d'entreprise ne peut être dissociée de son cadre de modélisation : la capitalisation des connaissances et l'augmentation des performances de l'entreprise se fait au travers de l'alignement du SI (et cela à l'aide des modèles). En effet, la modélisation permet de décrire, sous différents angles de vue, les structures de l'organisation et d'explicitier les liens entre elles.

Dans Merise, nous retrouvons les origines des cadres de modélisation dans le sens Modélisation d'Entreprise : plusieurs points de vue et différents niveaux d'abstraction. L'approche la plus illustrative est CIM-OSA (Computer Integrated Manufacturing Open System Architecture) puis GIM (GRAI⁷ Integrated Methodology) dans un second ordre (Vallespir, et al., 1989). Le cadre CIM-OSA se base sur trois axes fondamentaux qui constituent le cube CIM-OSA (Kosanke, 1995) : (i) l'axe de généricité, (ii) l'axe de dérivation relatif au cycle de développement, et (iii) l'axe d'instanciation. Chaque axe se décline en plusieurs vues ou fonction ce qui permet de fournir un support à l'ingénierie systématique d'un système de production. Par exemple, l'axe de génération couvre les vues organisation, ressources, information et fonction. Quant au cadre GIM, il offre un support pour modéliser et analyser des

⁷ GRAI : Graphe de Résultats et d'Activités Inter-relées

systèmes de décision des entreprises et aux systèmes intégrés de production (Doumeingts, et al., 1993). GIM considère quatre vues (information, décision, physique, fonction) pour trois niveaux de travail (conceptuel, structurel, réalisationnel). Notons que GIM ne fournit pas un langage de modélisation propre où il s'appuie sur des formalismes existants tel qu'IDEFO (Vallespir, et al., 1993).

Aujourd'hui, il existe un grand nombre de cadres pour l'architecture d'entreprise (Schekkerman, 2003), voire trop. Certains d'entre eux sont devenus des références tel que le cadre de Zachman (Zachman, 1987). C'est un cadre qui propose une structure logique pour « ranger »/ classer les représentations de l'entreprise qui ont un intérêt pour la direction / gestion de l'entreprise et / ou au développement de systèmes. Parmi les cadres en découlant, nous citons :

- TOGAF (The Open Group Architecture Framework), créé par un consortium industriel (Open Group, Sun Microsystems, Hitachi, Hewlett-Packard, Fujitsu), propose une méthode ADM (Architecture Development Method) et un ensemble d'outils de conception de l'architecture d'entreprise en complément d'un environnement d'architecture. La méthode ADM de conception de l'EA est fondée sur la gestion des exigences au niveau de l'entreprise. Ces exigences sont déduites des objectifs et des orientations métier de l'entreprise. L'architecture de chaque point de vue, conçue à partir de ces exigences, cible le métier de l'entreprise et le SI. Le TOGAF cible de plus la définition des technologies qui répondent le mieux aux exigences de l'entreprise. Ces technologies composent alors l'infrastructure du SI.
- DoDAF (Department of Defense Architecture Framework) et ses dérivés pour l'OTAN et le Royaume Uni. C'est un cadre de l'architecture d'entreprise centré autour de la préconisation de l'architecture SOA et des web services. De ce fait, il permet d'assurer l'interopérabilité des grands systèmes du SI de la défense américaine avec différents points de vue :
 - un point de vue organisationnel avec les échanges entre acteurs de la défense,
 - un point de vue système avec les échanges entre systèmes,
 - un point de vue technique avec les technologies préconisées.
- Le cadre ITIL (Information Technology Infrastructure Library) est une bibliothèque de bonnes pratiques liées à des exigences de performance et de qualité des systèmes développés. Ces bonnes pratiques ciblent le service après-vente des systèmes en s'assurant des performances et de la qualité perçues, d'une part, par le client du système, et de l'autre, par l'entreprise titulaire du SI contenant le système. Dans ce dernier cas, les préconisations sont aussi bien financières que liées à la continuité de service ou à la disponibilité des systèmes du SI.

Notons également qu'il existe d'autres approches qui reposent sur des architectures de référence : fondées sur des modèles d'entreprises et les méthodes de conception associées, comme par exemple CIMOSA (AMICE, 1993), ARIS (Scheer, 2002), GERAM (Bernus & Nemes, 1996). Elles se basent sur l'interaction des systèmes (approche systémique): analyse des flux, séparation des données et traitement en faisant la distinction entre les niveaux organisationnels et conceptuels.

Pour les différentes définitions et approches proposées par (Martin, et al., 2004), les cadres de modélisation d'entreprise manipulent les objets / composants / entités suivants :

- Objet : produit ou objet technique, information ou objet symbolique, etc.

- Ressources : humaines, matérielles, techniques, logicielles, etc.
- Activités et processus
- Les aspects dynamiques des organisations, économiques, humains.

Bien qu'il s'agisse d'un effort d'abstraction, de représentation et de modélisation, le choix du cadre en soit ne garantit pas le succès d'un projet de transformation d'une organisation. En effet, les parties prenantes de ce projet doivent maîtriser les enjeux de modélisation et adopter le cadre de modélisation choisi en fonction de la structure de l'entreprise et ses spécificités.

Nous développerons dans le paragraphe suivant les limitations de la pratique de l'architecture d'entreprise, notamment pour viser l'alignement dans un contexte complexe et dynamique.

2.4.4 Limitations et dilemme de l'Architecture d'Entreprise

L'architecture d'entreprise touche aussi bien des problématiques métier que des problématiques IT où la vision IT doit être alignée avec la vision métier. Alors que la modélisation d'entreprise arrive à maturité scientifique (Vallespir, 2003) (Chen, 2005) (Panetto, 2006) et technologique (Ferrarini, et al., 2006), force est de constater que sa pratique est encore trop peu courante (malgré ses apports et les succès rencontrés). La pratique de l'architecture d'entreprise dans les organisations rencontre un manque de démarche guidant la modélisation.

Dans la plupart des démarches d'alignement, les questionnements sont souvent portés sur le « quoi » des éléments à impacter (Kaidalova & Seigerroth, 2012) (Chan & Reich, 2007), et négligent comment parvenir à atteindre concrètement l'alignement Métier / IT (Kaidalova & Seigerroth, 2012) (Silvius, et al., 2009). En effet, cela rejoint le manque de précision sur les concepts nécessaires pour modéliser une architecture d'entreprise (Whittle & Myrick, 2004) (Salinesi & Thevenet, 2008) (Guizani & Ladet, 2010). Notons également la difficulté des passages entre les différents concepts et leur adaptation aux contextes particuliers des organisations (Ganesan & Paturi, 2008) (The Open Group, 2009). En effet, dans une étude de (Pettey & van der Meulen, 2009), les analystes de *Gartner* soulignent les pièges à éviter lors d'un projet d'architecture d'entreprise, dont notamment de ne pas engager les métiers et de ne faire que de l'architecture IT. (Kaisler, et al., 2005) mettent en avant la criticité de gérer des modèles d'entreprise hétérogènes et à différents niveaux de maturité. En effet, l'exercice de modélisation requiert diverses compétences pour tenir compte des différentes facettes de l'entreprise (couche métier, couche fonctionnelle, couche IT, etc.). Une seconde difficulté est d'arriver à définir une harmonie / cohérence entre ces modèles hétérogènes. En plus de leur cohérence, les modèles doivent être synchronisés pour assurer une interprétation commune intra-disciplinaire (Métier / IT). Aussi, le passage d'une architecture existante à une architecture cible crée une « tension d'interprétation » entre la partie continuité de fonctionnement selon les standards courants et l'introduction des nouveaux systèmes (Kaisler, et al., 2005). En rajoutant la nécessité de maintenir à jour ces différents modèles, l'architecture d'entreprise devient alors une démarche lourde et laborieuse.

Bien que l'architecture d'entreprise soit censée simplifier la compréhension de l'entreprise, elle porte en elle-même une lourdeur propre à la nature de l'exercice de modélisation, situation d'autant plus accentuée dans un contexte complexe et dynamique. En contrepartie, les pratiques d'architecture

visent principalement à la réduction de la complexité perçue d'un système en vue de sa transformation. Il s'agit d'une situation de dilemme (Bernus, et al., 2014) pour arriver à représenter simplement la complexité de l'entreprise, sans avoir à porter une complexité / lourdeur supplémentaire par l'exercice de représentation / l'usage des cadres de modélisation. La réponse à cette situation pourrait résider dans la capacité à simplifier le cadre de modélisation et de suivre une méthodologie pouvant intégrer les modifications et les évolutions rapidement (Bernus, et al., 2014). Nous nous appuyons fortement sur ce dernier point dans le chapitre 3 pour notre proposition d'une méthodologie d'alignement dans un contexte complexe et dynamique.

L'apport de l'architecture d'entreprise réside dans sa capacité à faire le lien entre les différentes visions de l'entreprise afin de parvenir à l'alignement. A cet effet, l'ingénierie de l'alignement doit s'enrichir des autres disciplines déjà existantes : nous proposons dans ce qui suit d'aborder quelques concepts liés à l'ingénierie de l'alignement.

2.5 Autres concepts relatifs à l'ingénierie de l'alignement

L'ingénierie de l'alignement est une discipline qui porte des volets techniques, fonctionnels, et sociologiques. Un projet d'alignement ne peut réussir qu'en tenant compte de sa nature multidisciplinaire et en donnant autant d'importance à chacune des volets. Notre conviction a été confortée durant nos travaux sur l'alignement Métier / IT dans les chapitres 3 et 4. Faute de pouvoir traiter tous les éléments de l'alignement, nous donnons dans ce qui suit un bref aperçu des autres disciplines qui contribuent au succès d'une démarche d'alignement, notamment *l'ingénierie des exigences*, les *ontologies*, les *objets frontières*, et les méthodes de développement agiles en informatique.

2.5.1 L'ingénierie des Exigences

La modélisation d'entreprise est une étape nécessaire pour identifier, simuler, et mettre en œuvre les transformations des organisations. L'architecture d'entreprise apporte un support méthodologique et pratique pour concrétiser ces transformations. En effet, elle permet de modéliser l'entreprise sous ses différentes perspectives et de préciser les articulations entre ses différentes couches. Ainsi, l'architecture d'entreprise peut être considérée comme un moyen pertinent pour la mise en place de l'alignement Métier / IT (Wang, et al., 2008). Néanmoins, pour les organisations complexes et évoluant dans un environnement dynamique, cette approche présente des limitations en terme de mise à jour des modèles, de leur synchronisation et de maintien du même degré de maturité pour ces modèles. Notons aussi qu'aucune démarche d'alignement ne pourra aboutir si elle n'est pas basée sur une vision Métier claire et compréhensible pour la prise en compte des évolutions des besoins.

Le premier pas pour atteindre l'alignement Métier / IT consiste donc à déployer un processus d'ingénierie des exigences pour capturer, éliciter et formaliser les besoins « effectifs » des utilisateurs (Aurum & Wohlin, 2005) sans être conditionné par la faisabilité technique. L'objectif étant de différencier entre la situation existante et celle induite par l'IT, afin de dresser un diagnostic « objectif ». Ainsi, il faut différencier la cible du système à atteindre de celle qui sera effectivement réalisée.

Prenant l'exemple des métiers en fabrication de semi-conducteurs, l'identification des besoins s'avère être une tâche délicate. En effet, dans un contexte de fabrication automatisée, la disponibilité des solutions informatiques a une place importante dans l'exécution des procédés et des processus de production. Et du fait du changement répétitif (industrialisation d'une nouvelle génération de produits tous les 12 à 18 mois), les acteurs métiers tendent à dégrader l'expression de leur besoin pour disposer rapidement de solutions informatiques, qui seront certes partielles mais utilisables. Avec les évolutions de l'environnement de production, les futures solutions à livrer seront bâties sur des versions déjà dégradées, créant ainsi un cercle vicieux de compromis pour la qualité de l'expression des besoins et celle des solutions livrées, et où les choix techniques d'implémentation priment sur la définition des solutions fonctionnelles.

Ainsi, l'ingénierie des exigences établit une relation entre ce que le système doit faire (le quoi, décrit par des spécifications) et ce pourquoi il doit le faire (le pourquoi qui traduit les attentes des utilisateurs et des décideurs). L'ingénierie des exigences permet de faire correspondre les fonctionnalités du système et les besoins organisationnels.

Dans le paragraphe suivant, nous aborderons la problématique de l'interprétation des modèles et les apports des ontologies à ce sujet.

2.5.2 Potentiel des ontologies

La composante informatique aujourd'hui est de plus en plus présente dans les organisations, en particulier dans l'industrie des semi-conducteurs. La course à la miniaturisation et à des produits toujours plus performants intensifie le partage d'informations entre des métiers traditionnellement séparés (maintenance, ingénierie produit ou process, gestion de production, etc.). Ainsi, la nécessité de lier les métiers, la multitude des acteurs, et l'automatisation des procédés de fabrication (multiplication des sources de données en générant un volume important), d'une part brouillent le périmètre de ces métiers, et d'autre part créent une diversité des pratiques pour l'interprétation et l'exploitation de données. Ce dernier point nous oriente vers les ontologies.

Le terme ontologie est issu du domaine de la philosophie de la connaissance. Il désigne l'ensemble des concepts d'un domaine ainsi leurs relations. Les ontologies sont définies comme étant une spécification formelle d'une conceptualisation partagée (Borst, 1997). Les ontologies sont lisibles par les humains. Ceci signifie qu'elles peuvent être développées, partagées, et comprises non seulement par des programmes informatiques, mais aussi par les communautés d'experts de domaine ainsi que des utilisateurs potentiels. L'apport des ontologies réside aussi dans la capacité à fusionner / combiner des ontologies développées séparément pour permettre la communication entre des SI qui doivent manipuler des informations basées sur les mêmes concepts.

Nous soulignons ici que les ontologies interagissent avec la discipline de l'ingénierie des exigences pour la représentation des besoins. En effet, les ontologies offrent la possibilité de clarifier la sémantique en structurant les concepts et en offrant un moyen de partage de la connaissance, d'une part entre experts métiers, et d'autre part entre experts métiers/IT. L'objectif est de contribuer à la clarification de la couche fonctionnelle/applicative (Zouggar, et al., 2006).

2.5.3 Les objets frontières

Les projets de modélisation de SI font appel à différents experts où chaque intervenant a sa propre expérience de modélisation, ses propres perceptions (Chapurlat, 2007) (Castano & Antonellis, 1998). La problématique ne porte plus uniquement sur la sémantique (traitée par les ontologies), mais sur la perception même des objets et de leur utilisation. De plus, nous faisons la différence entre une ontologie d'un point de vue Métier et une ontologie d'un point de vue IT.

Sur un autre volet, nous constatons que le partage des informations n'équivaut systématiquement pas à un partage des concepts : chaque modèle métier a historiquement développé ses propres définitions. Cette différenciation de perception des concepts nous ramène au thème des objets frontières (Leigh Star & Griesemer, 1989) (Leigh Star, 2010), où l'objet manipulé est interprété différemment selon l'acteur, son environnement, et sa pratique. Il est donc important d'identifier les concepts partagés et de mettre en place une gestion conjointe du modèle de données sous-jacent à ces concepts.

La bonne compréhension et interprétation des besoins des utilisateurs contribuent à définir un cahier des charges clair et précis. La prochaine étape est le développement informatique, et nous aborderons dans le paragraphe suivant les méthodes de développement agile.

2.5.4 Méthodes de développement agile en informatique

Les techniques de développements informatiques ont bien évolué depuis les années 70 jusqu'à aujourd'hui. Nous sommes passés d'un codage en cascade / cycle en V, avec une philosophie incrémentale, à un codage adaptatif et itératif (en restant aussi incrémental). La notion de méthodes *agiles* sollicite toutes les parties prenantes d'un projet de développement pour couvrir la spécification, la production, la validation et le test en continu des applications.

Il existe plusieurs méthodes de développement agiles (scrum, XP, ASD, etc.) qui partagent les concepts d'adaptation, d'incrémental, et d'itération, et qui peuvent être plus au moins adéquates en fonction de la nature du projet (taille du projet et de l'équipe, environnement technique, etc.) (Qumer & Henderson-Sellers, 2008). Avec la maturité actuelle des méthodes de développement agiles, où l'accent a toujours été mis sur la rapidité des livraisons en prenant en compte les besoins clients et leur évolution, l'agilité a toujours été perçue comme une vertu et non pas un impératif. L'agilité que nous visons ne porte pas uniquement sur les modes de livraison IT ; c'est une agilité vue comme une caractéristique propre au fonctionnement du SI afin de viser l'alignement. D'ailleurs, dans une étude empirique de 1999 à 2008 menée par (Baskerville, et al., 2011), les auteurs considèrent l'alignement comme la phase suivante à l'agilité des développement informatiques.

2.6 Conclusion

Le rôle traditionnel des systèmes d'information comme courroie de transmission entre le système de décision et le système opérant devient de plus en plus difficile à tenir du fait de l'évolution rapide du contexte économique et technique. Les fonctionnalités du système d'information ne se

limitent plus à un support décisionnel, et avec l'automatisation croissante de la fabrication et des processus décisionnels, les SI sont désormais au cœur des activités opérationnelles de l'entreprise. Ainsi, l'alignement des SI devient un levier de compétitivité et d'efficience.

Atteindre l'alignement et le maintenir n'est pas une tâche facile, particulièrement dans un contexte complexe et dynamique. La complexité des évolutions associées au rythme rapide de changement limitent les capacités de disposer d'un SI à l'image des métiers. Aussi, dans le cadre de notre étude pour les industries de semi-conducteurs, le caractère difficilement prévisible des transformations exige que les SI aient une aptitude à toujours évoluer. Ainsi, en se référant au SAM, nous visons à atteindre un alignement au niveau interne, par une intégration fonctionnelle, entre les domaines Métier et IT.

Les approches d'alignement actuelles ne sont pas adaptées pour des changements non planifiés avec un intense rythme d'évolution. Déjà pour l'hypothèse de départ, ces approches considèrent que l'obsolescence de l'IT devance celle de la configuration des métiers. Alors que c'est l'inverse pour le cas de notre étude où, dès qu'une solution IT est livrée pour couvrir un besoin donné, cette solution est déjà obsolète. Bien souvent en effet, nous constatons que la disponibilité de la solution technique va primer sur la prise en compte du besoin réel et donc contraindre l'évolution des processus métier. En outre, ces évolutions viendront à leur tour brouiller la stratégie de développement globale du SI. Ainsi, les premières difficultés résident dans la capture des besoins « réels », la formalisation, la vérification et la validation de leur mise en œuvre. Aussi, ces démarches ne sont pas adaptées / outillées pour prendre en compte des évolutions non planifiées. Ces démarches adoptent généralement une approche ascendante où la vision préparée et claire des métiers définit la trajectoire d'évolution des SI (alors que dans le cadre de notre étude, nous ne pouvons pas assurer systématiquement une anticipation des besoins métiers). À cela s'ajoute le manque de cadre méthodologique qui permet la mise en œuvre concrète de ces approches. Même si l'architecture d'entreprise et ses cadres (*frameworks*) apportent un début de solution pour la mise en place de l'alignement, d'autres limitations sont soulevées en matière d'hétérogénéité des modèles de représentation, de leur synchronisation et maintenance, de la nécessité de diverses expertises en modélisation, etc. A cela s'ajoute la lourdeur même de l'architecture d'entreprise, point qui se trouve encore plus accentué dans un contexte complexe et dynamique tel que celui de l'industrie des semi-conducteurs.

Tenant compte de ces limitations, nous proposons, dans le chapitre suivant, notre méthodologie pour atteindre, dans un contexte complexe et dynamique, l'alignement au niveau interne par une intégration fonctionnelle entre les domaines Métier et IT.

Chapitre 3

Méthodologie pour l'alignement des systèmes d'information en fabrication de semi-conducteurs

Tenant compte de la revue de littérature, et des spécificités du contexte industriel de fabrication de semi-conducteurs, nous proposons dans ce chapitre une méthodologie axée sur le concept de Modèle de Référence pour atteindre l'alignement. Nous reviendrons sur les objectifs dans la section 3.1, puis nous présenterons dans la section 3.2 la méthodologie basée sur le Modèle de Référence. Nous y détaillerons l'organisation nécessaire pour définir le Modèle de référence et la méthodologie pour le construire.

3.1	Objectifs.....	51
3.2	Méthodologie par le Modèle de Référence	52
3.4	Construction du Modèle de Référence	60
3.4.1	Organisation pour la construction du Modèle de Référence.....	60
3.4.2	Méthodologie de construction du Modèle de Référence	61
3.4.2.1	Identification des besoins des utilisateurs	62
3.4.2.2	Définition des scénarios et des concepts fonctionnels leur correspondant	62
3.4.2.3	Définition d'une ontologie des concepts fonctionnels	63
3.5	Conclusion	64

3.1 Objectifs

L'alignement des systèmes d'information et des besoins métiers dans un environnement complexe et dynamique, tel que celui de la fabrication des semi-conducteurs avec une variété importante de produits à gérer, requiert la définition d'une méthodologie respectant les spécificités de cet environnement. Nous rappelons les éléments fondamentalement distinctifs du chapitre 1 par (i) la forte automatisation des moyens de production, vu la criticité des produits à réaliser, et par (ii) la forte dépendance informatique que cela induit pour les systèmes de gestion et de contrôle de la production afin de couvrir la large gamme de produits et de technologies. En raison de l'introduction continuelle de nouveaux produits et de l'industrialisation de nouvelles technologies, ces systèmes rencontrent une exigence de forte d'évolution où il faut continuer à prendre en compte l'existant, et ne pas perturber leur fonctionnement courant.

La multitude des facteurs d'évolution (technologique, contexte économique, contraintes réglementaires, complexité des outils et des techniques algorithmiques), associées à un rythme effréné des transformations, nécessite une remise en cause globale du mode de conception et d'évolution des systèmes de gestion de la production et des procédés de fabrication. Principalement, il faut veiller à la prise en compte de la différence des rythmes de changements Métier / IT où les exigences opérationnelles dépassent la capacité à livrer les solutions informatiques adéquates à temps. Avec comme risque majeur, une formulation des besoins qui soit conditionnée (volontairement ou pas) par la disponibilité des solutions informatiques ainsi que par la faisabilité technique du développement. Même si la complexité des évolutions métiers pourrait être gérée à terme dans un contexte standard de production, le caractère répétitif et dynamique de leur évolution accroît les difficultés d'une correspondance entre les attentes des utilisateurs et les solutions informatiques livrées. Nous schématisons cette situation par la Figure 3.1.

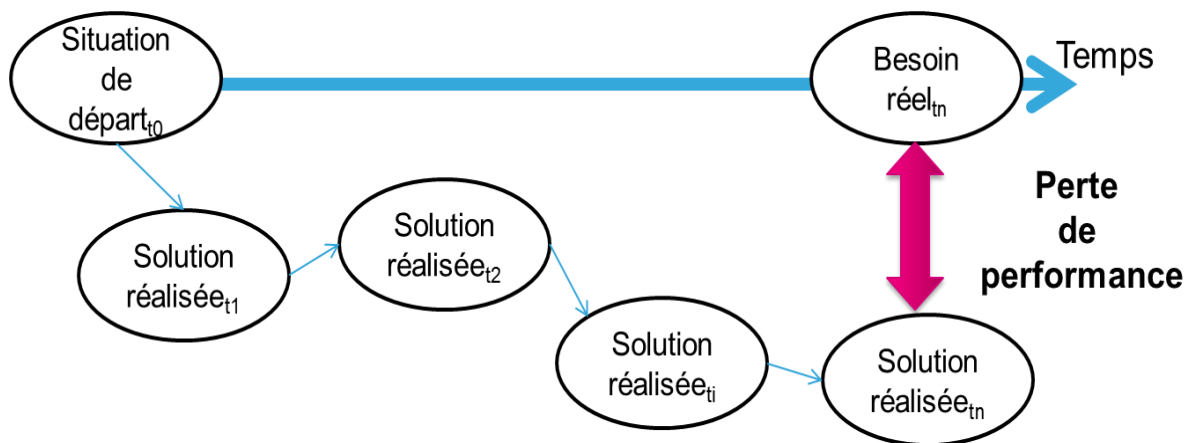


Figure 3.1 : Illustration de la dérive des solutions réalisées face aux besoins des utilisateurs

Partant d'une situation initiale à t_0 où les opérationnels expriment des règles métiers à intégrer aux systèmes de gestion et de contrôle de la production, une première solution informatique est proposée en t_1 . Vu les contraintes de temps et de coûts, cette solution livrée ne répond que partiellement aux

attentes des utilisateurs. Avec le rythme d'évolution des métiers, cette solution se trouve dépassée / obsolète pour répondre aux spécifications qui ont déjà évolué. A t2, une nouvelle solution est proposée afin de mieux satisfaire les attentes des utilisateurs. Cependant, elle est bâtie à la continuité de la version précédente, déjà partiellement adéquate, même si les métiers l'ont adoptée en t1 : les opérationnels se sont accommodés de la solution informatique de t1, qui est devenue leur standard lors de la spécification des nouveaux besoins à intégrer dans la nouvelle solution à livrer en t2 ! Ce cercle vicieux est accentué par la nature la dynamique des évolutions, où à terme, l'écart ne fait que se creuser entre les attentes des utilisateurs et la vision informatique. De ce fait, les opérationnels se trouvent à raisonner en termes de solution informatique et non plus dans une logique métier.

Sur un autre plan, la méthodologie que nous proposons doit s'accommoder des limitations des approches d'alignement existantes pour la prise en charge d'évolutions non planifiées, vu que dans le cadre de notre étude, nous ne pouvons pas systématiquement assurer une anticipation des besoins métiers. Aussi, notre proposition doit donner un sens concret de l'alignement et surtout simplifier sa mise en œuvre. Les défis étant (i) de ne pas rajouter une couche de complexité, due à l'action de l'alignement, à la complexité existante du contexte de fabrication de semi-conducteurs, (ii) de s'inspirer des principes de l'architecture d'entreprise tout en contournant la lourdeur de sa mise en œuvre, et (iii) de pouvoir gérer la nature répétitive et dynamique des changements. Ainsi, la méthodologie à proposer doit permettre la réactivité pour répondre continuellement à de nouveaux besoins, dans la mesure où ces derniers ne peuvent pas toujours être planifiés. De plus, cette méthodologie doit assurer une représentation fidèle de la complexité des sujets à traiter, tout en simplifiant les moyens de communication entre les acteurs Métiers et IT.

Un des résultats majeurs de notre proposition consiste à clarifier le cap d'évolution fonctionnelle au niveau métier et la trajectoire d'évolution du SI, où ce dernier subit les recommandations métiers et non pas l'inverse.

Dans ce qui suit, nous définissons la méthodologie par le Modèle de Référence afin d'atteindre l'alignement dans un environnement complexe et dynamique. Ensuite, nous détaillons la construction du Modèle de Référence afin d'illustrer la méthodologie.

3.2 Méthodologie par le Modèle de Référence

Comme indiqué à la fin de la section 2.3.1, nous rappelons que dans le cadre de nos travaux, et en se référant au SAM (Henderson & Venkatraman, 1993), nous visons à atteindre une intégration fonctionnelle du domaine Métier au domaine IT au niveau interne. La méthodologie que nous proposons tient compte à la fois de la nature complexe et dynamique de l'environnement de l'étude ainsi que de ses conséquences, et vise aussi à guider la mise en œuvre opérationnelle de l'alignement.

Afin de gérer la différence des rythmes de changement entre l'évolution des métiers et celle de l'IT, nous proposons de créer une zone tampon entre eux. Cette zone tampon constitue un Modèle de Référence pour la description des métiers, et reflète les cibles à atteindre au niveau IT. En s'inspirant du

SAM (Henderson & Venkatraman, 1993), nous positionnons le modèle de référence au niveau interne. La Figure 3.2 illustre notre proposition.

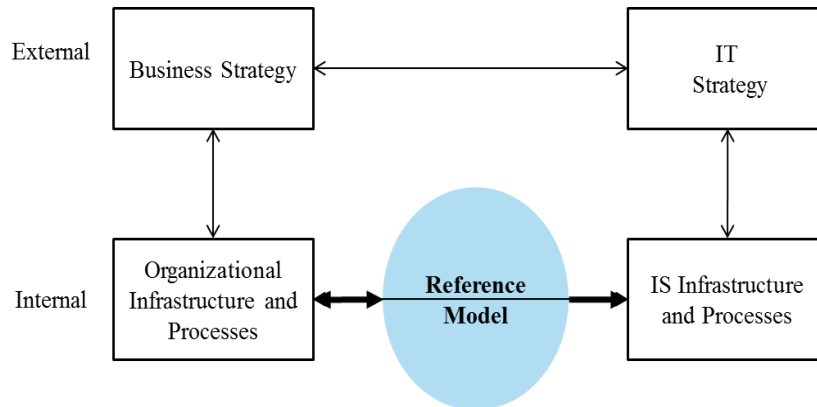


Figure 3.2 : Mise à jour du SAM avec l'introduction du Modèle de Référence comme zone tampon

Le modèle de référence s'intègre au SAM afin de moduler l'intégration fonctionnelle du domaine Métier au domaine IT. En effet, nous avons constaté que la gestion des différences des rythmes de changements entre ces domaines nécessitait de distinguer formellement l'évolution Métier de l'évolution IT. Ainsi, le Modèle de Référence porte une aptitude double ; (i) pouvoir refléter les évolutions des métiers et de les prendre en compte lors des évolutions, et (ii) d'être interprétable par l'IT en traduisant la vue métier en une vue IT. Nous schématisons la nécessité de désynchroniser la vue Métier de la vue IT dans la Figure 3.3.

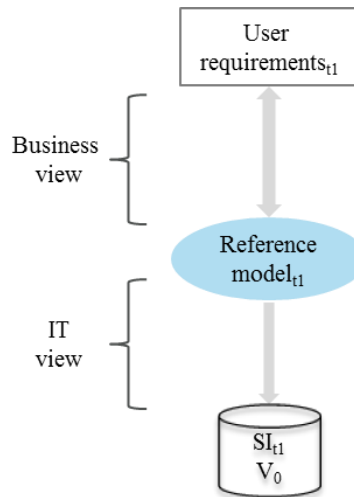


Figure 3.3 : Dissociation de la vue Métier de la vue IT par le Modèle de Référence

Dans un premier temps, la mise en place d'une couche intermédiaire entre la collecte des besoins et les développements informatiques permet de dissocier les deux mondes en dressant une frontière entre eux. Cette zone tampon portera une modélisation des besoins réels et actuels des utilisateurs, et permettra aussi de définir la cible à atteindre au niveau informatique.

Les besoins des utilisateurs évoluant régulièrement, cette modélisation des besoins réels peut être faite en suivant le rythme de leur évolution. Le Modèle de Référence va donc évoluer de manière incrémentale. Si les ressources de modélisation sont disponibles, il est intéressant de fonctionner avec des incréments pour suivre de manière la plus instantanée possible l'évolution des besoins. La Figure 3.4 schématise cette situation.

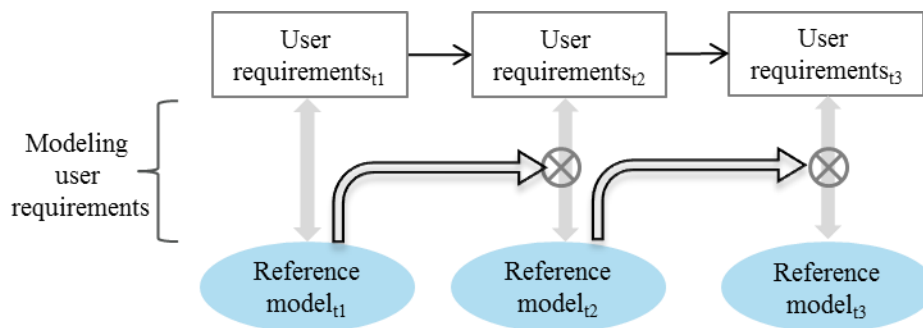


Figure 3.4 : Evolution incrémentale du Modèle de Référence

Le rythme des mises à jour Métier est quasi hebdomadaire voire quotidien, alors que des semaines et mois sont nécessaires pour les développements informatiques. Ainsi, les besoins des utilisateurs évoluent alors que les développements informatiques ne sont pas encore achevés : la capacité d'intégrer instantanément les mises à jour Métier permet de limiter le conditionnement des SI sur l'expression des besoins.

Le modèle de référence constitue la cible à atteindre par le SI. Les évolutions du SI sont dépendantes des spécifications du modèle de référence, et des contraintes d'implémentation en termes technique et de coûts. La Figure 3.5 illustre le positionnement des SI par rapport au modèle de référence.

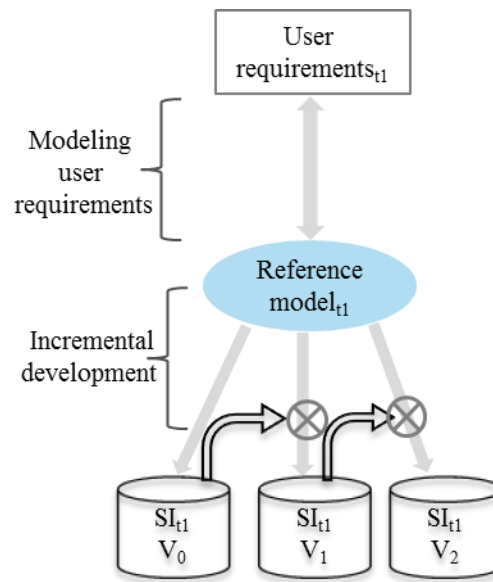


Figure 3.5 : Positionnement des développements IT par rapport au modèle de référence

La première version du modèle de référence reflète les besoins des utilisateurs à l'instant t_1 . Pour la même version du modèle de référence, plusieurs développements informatiques sont prévus. A ce niveau, les méthodes agiles de développements informatiques permettent de gagner en performance, d'où les versions V_0 , V_1 , et V_2 pour le SI_{t1} .

La flexibilité apportée par le Modèle de Référence est qu'il permet de traduire les besoins des utilisateurs sans être contraint par les caractéristiques du système d'information existant et tout en assurant une continuité fonctionnelle, puisqu'il est mis à jour depuis sa dernière version. Un autre avantage important de l'usage du modèle de référence, notamment dans un environnement complexe et dynamique, est son aptitude à prendre en compte des évolutions métiers non anticipées. En effet, le modèle de référence est une représentation conceptuelle des évolutions : le coût de sa mise à jour se limite aux investigations terrains et à l'exercice de modélisation. La Figure 3.6 schématise la mise à jour du modèle de référence.

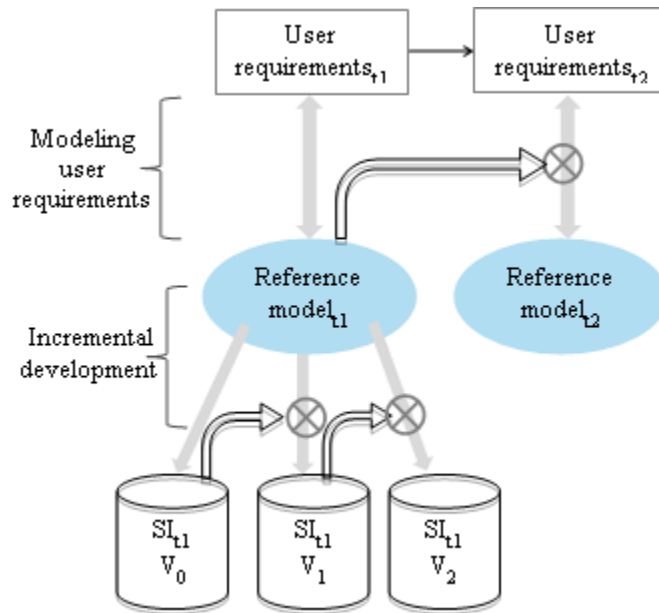


Figure 3.6 : Mise à jour des besoins métiers par le modèle de référence

Dans la Figure 3.6, le modèle de référence assure de suivre en « temps réel » les évolutions des besoins et assure à terme leur prise en compte effective. L'émergence de nouveaux besoins métiers à l'instant t_2 est prise en charge par le modèle de référence en le mettant à jour depuis sa version de l'instant t_1 . La question qui peut se poser à ce niveau est : « est-ce que le Modèle de Référence à l'instant t_1 doit influencer l'expression des besoins à l'instant t_2 ? » Le Modèle de Référence est la trace de la formalisation des besoins des utilisateurs, il est donc intéressant de reprendre ce modèle pour chaque évolution des besoins puisque cela garantira une cohérence dans les choix.

Le Modèle de Référence doit être la représentation fidèle des besoins métiers et constitue la cible à atteindre pour le SI. En conservant la description des besoins fonctionnels derrière chacun de ses composants, le modèle de référence permet de comprendre à qui et à quoi servent ces composants et dans quels processus ils sont- impliqués. Plus encore, il permet de s'assurer de la non concurrence des besoins entre eux, et d'éviter des situations où la vue fonctionnelle porterait des ambiguïtés ou des contradictions. Ainsi, le Modèle de Référence permet d'observer la cohérence des choix fonctionnels et de garder une trace de leur évolution. Aussi, la forte automatisation des moyens de production et la présence d'une importante composante informatique dans l'industrie des semi-conducteurs font que tous les métiers ont un usage intensif des données, et sont tous interconnectés. Le modèle de référence peut être vu comme une demande faite aux utilisateurs d'avoir constamment à jour une modélisation des concepts avec lesquels ils travaillent. **L'interface avec l'IT se fera alors entre deux modélisations et non plus entre une expression des besoins et une modélisation.** À ce stade, il est intéressant de constater que les besoins des utilisateurs sont maintenant basés sur le Modèle de Référence, alors qu'auparavant, ils étaient conditionnés par les livraisons des différentes versions du système d'information. Notons aussi, dans l'exemple de la Figure 3.6, l'absence à l'instant t_2 de développement informatique relatif à la mise à jour du Modèle de Référence. Cela peut s'expliquer par la non-disponibilité des ressources nécessaires pour la réalisation des développements informatiques ou par un

choix délibéré de ne lancer une mise à jour des SI que lorsque les évolutions seront suffisamment conséquentes. La raison peut être relative à des décisions budgétaires, mais il faut aussi prendre en considération l'impact de la non-prise en compte des nouveaux besoins des utilisateurs sur la performance de l'organisation et les manques à gagner... En effet, la gestion des mises à jour des SI ne doit pas être centralisée au niveau IT mais partagée avec les Métiers pour juger de la nécessité / priorité / criticité des mises à jour.

Un bénéfice supplémentaire de l'utilisation du Modèle de Référence est la synchronisation des vues Métiers / IT tout en permettant leur dissociation. La Figure 3.7 schématise une situation complexe où à la fois les besoins des utilisateurs continuent d'évoluer (d'où la mise à jour du Modèle de Référence) et des développements informatiques sont réalisés.

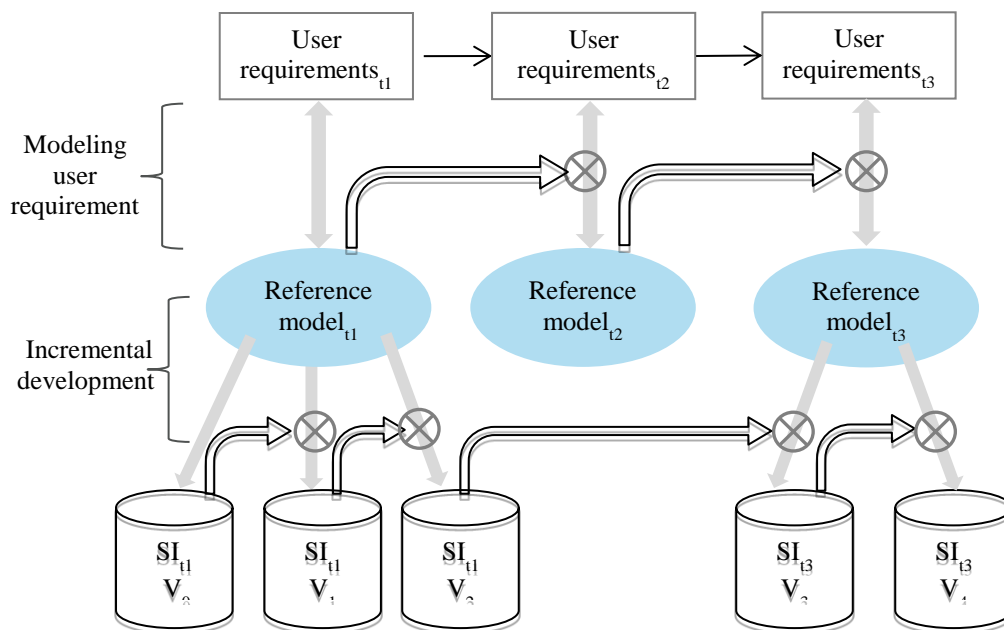


Figure 3.7 : Synchronisation des vues Métier / IT

Dans la Figure 3.7, nous remarquons les différentes mises à jour du modèle de référence en passant par les instants t1, t2, et t3 où ce dernier évolue chaque fois depuis sa dernière version tout en prenant en compte les nouveaux besoins des utilisateurs. Bien que des développements informatiques aient été entamés pour le modèle de référence dans sa version de l'instant t1, nous notons qu'aucune livraison informatique n'a été prévue pour la nouvelle version du modèle référence à l'instant t2 pour des raisons de coûts ou de ressources, etc. L'émergence de nouveaux besoins métiers à l'instant t3 n'a pas été contrainte ni par l'absence de livraisons informatique à l'instant t2 ni par la disponibilité des solutions à l'instant t1. En effet, la capture instantanée des besoins par le modèle de référence a permis d'assurer l'évolution du cap fonctionnel des besoins des utilisateurs, et de ne pas être biaisé par la composante informatique. A l'instant t3, les développements informatiques ciblaient la dernière version du modèle de référence, tout en assurant une continuité de service, en se basant sur la version V₂ du SI de l'instant t1.

Le scénario d'évolution à l'instant t3 illustre la pertinence du Modèle de Référence pour la sécurisation de la collecte des besoins et sa non-altération par l'indisponibilité des solutions informatiques correspondantes. En effet, la non-livraison des solutions informatiques à l'instant t2 n'affecte nullement les nouveaux besoins qui émergent à l'instant t3. Plus encore, les développements informatiques à l'instant t3 se baseront sur la dernière version du Modèle de Référence qui est le plus fidèle aux besoins des utilisateurs. Vu la nécessité d'avoir une continuité de fonctionnement, ces mêmes développements prendront également en compte les livraisons informatiques réalisées à l'instant t1 (aucune livraison informatique n'a été faite à l'instant t2). Les arbitrages et choix de développements informatiques sont effectués lors de cette phase. En effet, autant des compromis peuvent être acceptés pour les développements informatiques, aucun compromis ne sera accepté sur la qualité de la modélisation des besoins ou pour leur prise en compte effective. D'ailleurs nous rappelons qu'en dépit de l'absence d'une entière implémentation du Modèle de Référence, il est toujours possible d'identifier la trajectoire fonctionnelle à suivre puisque le Modèle de Référence est toujours fidèle aux besoins des utilisateurs. Ceci est particulièrement important étant donné que les délais de mise à jour informatique entre chaque Modèle de Référence sont de l'ordre de semaines ou de mois, voire d'une année. Ainsi, le **désalignement** entre le SI et les besoins métiers est pallié par des développements informatiques prenant toujours en compte la dernière version du Modèle de Référence (la cible) et la version d'implémentation précédente du SI (l'existant). Les arbitrages / compromis pour la livraison du SI sont définis lors de cette phase. En effet, notre approche se veut pragmatique et concrète : la vitesse de développement des différentes versions du SI ne peut être augmentée indéfiniment. Cette dernière requiert un fonctionnement en pas à pas, une version après l'autre, alors que les besoins des utilisateurs évoluent de manière continue. Ainsi, nous ne visons plus de supprimer le désalignement Métier /IT, mais d'organiser la possibilité de créer des points de rencontre entre les différentes versions du SI avec les besoins des utilisateurs, où (i) soit cet alignement sera temporairement atteint, (ii) soit le désalignement sera réduit et maîtrisable / acceptable.

Le principe de mise à jour du Modèle de Référence avec les développements informatiques associés est préconisé pour la suite des évolutions comme schématisé sur la Figure 3.8.

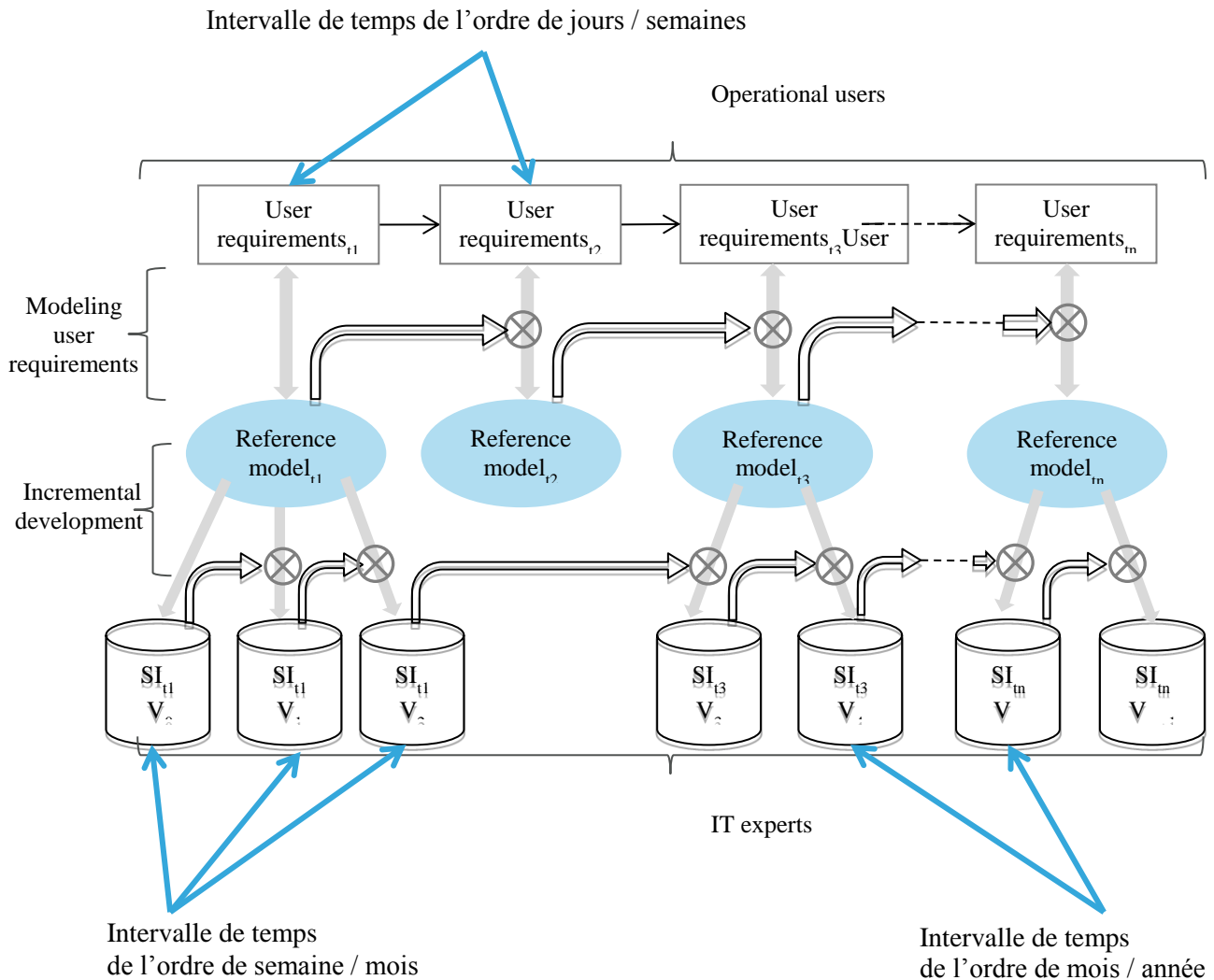


Figure 3.8 : Méthodologie d'alignement par le Modèle de Référence

La Figure 3.8 illustre la méthodologie d'alignement par le modèle d'alignement. Nous distinguons la désynchronisation des domaines Métiers et IT. Par ses différentes mises à jour incrémentales, le modèle de référence suit instantanément les évolutions des besoins des utilisateurs. Ainsi, pour chaque évolution des besoins, des instants t_1 à t_n , correspond une nouvelle version du modèle de référence. Dans la même logique, différentes versions et livraisons de SI sont réalisés des instants t_1 à t_n pour chaque évolution de modèle de référence, dans la mesure du possible. L'absence d'une livraison SI, comme c'est le cas à l'instant t_2 , n'aura aucun impact sur l'évolution des besoins métiers, et sera rattrapée lors du déploiement du modèle de référence à l'instant t_3 . Notons que chaque modèle de référence peuvent lui correspondre plusieurs versions du même SI.

Le vue d'ensemble de la méthodologie d'alignement par le Modèle de Référence de la Figure 3.8 nous permet de souligner un autre avantage : « la préparation du terrain » pour les futures implémentations. Même si initialement ces implémentations sont hors d'atteinte, la trajectoire fonctionnelle offerte par le Modèle de Référence permet de se rapprocher de la cible du SI à moyen ou long terme. Concrètement, en optant aujourd'hui pour des choix d'implémentation et en ayant en perspective les besoins émergents caractérisés dans le Modèle de référence, les prochaines livraisons du système d'information seront « naturellement » plus facilement intégrables au SI existant. La formule gagnante est qu'avec relativement peu d'effort informatique par la suite, nous pourrions satisfaire une demande qui semblait être initialement impossible.

Dans ce qui suit, nous détaillerons l'organisation nécessaire pour définir le Modèle de Référence et la méthodologie de sa construction.

3.4 Construction du Modèle de Référence

La construction du Modèle de Référence suit un processus de création où la dimension organisationnelle est primordiale pour sa réussite. Nous décrivons dans les sections qui suivent l'organisation humaine à mettre en place ainsi que les étapes de la définition du Modèle de Référence. La mise en œuvre industrielle dans la section 4.4 permettra d'illustrer nos propos.

3.4.1 Organisation pour la construction du Modèle de Référence

Le Modèle de Référence est assimilable à une zone tampon entre les domaines Métiers et IT, afin de pouvoir gérer la différence des rythmes de leur évolution et parvenir à leur alignement. L'expression des besoins est remontée depuis les utilisateurs opérationnels jusqu'aux équipes de développement informatique et cela, en suivant un processus de collecte, de filtrage, de vérification et de validation. Ainsi, le Modèle de Référence porte une étiquette double : Métier et Informatique. Pour assurer cette propriété, nous préconisons la constitution de deux groupes d'études qui doivent collaborer pour la construction du Modèle de Référence.

Le premier groupe est formé par les *Experts Méthodes* : Ils ont la responsabilité de recueillir les besoins des utilisateurs et de centraliser cette collecte. La centralisation permet de comparer les besoins entre les différents groupes d'usage (entre les différents ateliers de production par exemple), que ce soit en termes de pratiques métiers ou de la façon dont sont utilisés les outils informatiques (et leurs impacts sur l'expression des besoins). Cela permet également de déceler les particularités des pratiques / besoins émanant de contraintes spécifiques à l'environnement de travail de ces groupes d'usage ou dues à des raisons culturelles/historiques. Aussi, c'est l'occasion de s'assurer de la cohérence du langage partagé en termes de définitions et de connaissances développées. La seconde mission des *Experts Méthodes* est de traduire les besoins recueillis aux équipes informatique (nous reviendrons plus en détail sur cet aspect au dans la section 3.4.2). En effet ce groupe développe, en plus de ses connaissances terrains, une expertise en modélisation et en langage informatique. Dans une première approche, nous pourrions assimiler les missions des *Experts Méthodes* au rôle de l'assistance à la maîtrise d'ouvrage (AMO). Plus encore, l'effort de modélisation des besoins métiers est l'occasion d'une prise de recul, qui doit être

animée par ces *Experts Méthodes* afin d'être sûr que les besoins de modélisation sont partagés entre les différents utilisateurs et qu'ils représentent l'état de l'art. Par exemple, cela permettra d'éviter d'avoir deux besoins quasi identiques exprimés différemment entre deux groupes d'utilisateurs. Ainsi, nous soulignons que ce groupe a aussi la responsabilité d'homogénéiser/uniformiser les pratiques entre les différents groupes d'usage (tant qu'il ne s'agit pas de cas particuliers) et à diffuser les bonnes pratiques suite aux études terrains et aux préconisations issues du Modèle de Référence (nous reviendrons également plus en détail sur cet aspect dans la section 3.4.2).

Quant au deuxième groupe, il est le miroir des *Experts Méthodes* au niveau informatique : nous le nommerons les *Experts IT*. En plus de leur expertise informatique, ils ont une bonne compréhension des problématiques opérationnelles des acteurs métiers. Participant à la construction du Modèle de Référence avec les *Experts Méthodes*, ils transfèrent les conclusions aux équipes de développement informatique. Ainsi, le Modèle de Référence constitue le « lieu » de rencontre entre les différents experts où les visions Métiers et système d'information sont partagées et validées : Le modèle de référence offre un environnement adéquat permettant l'implication des acteurs métiers de l'entreprise dans la spécification de leurs besoins cible en SI, et l'alignement de ce système, avec le partage de cette vision avec les équipes informatiques. À la fin de cette étape, nous devons disposer d'un modèle lisible par les utilisateurs et compréhensible par les développeurs IT.

Dans ce qui suit, nous expliquerons comment est construit le Modèle de référence.

3.4.2 Méthodologie de construction du Modèle de Référence

Une fois l'organisation humaine mise en place, nous pouvons à présent dérouler le processus de création du Modèle de Référence. Les étapes sont les suivantes :

- **Identification des besoins des utilisateurs** (illustration par la mise en œuvre industrielle dans la section 4.4.1). Cette étape consiste à réaliser un travail de fond sur l'élicitation des besoins métiers en faisant abstraction des considérations liées aux applications informatiques. Le message à faire passer est de ne pas restreindre l'expression des utilisateurs en conditionnant leur mode de pensée par la disponibilité des solutions informatiques. Ce n'est pas parce qu'un besoin ne pourra pas être réalisé (ou atteint d'un point de vue informatique) que pour autant ce besoin n'a pas le droit d'exister et d'être explicité !
- **Définition des scénarios et des concepts fonctionnels leur correspondant** (illustration par la mise en œuvre industrielle dans la section 4.4.1). L'objectif de cette étape est de retrouver l'essence même des besoins exprimés. Il s'agit d'une traduction en termes de scénarios de réalisations. L'intérêt d'imaginer les scénarios est de porter la réflexion sur l'identification et la définition des « solutions » fonctionnelles qui permettent d'y répondre : nous parlerons de concepts fonctionnels. Chaque concept fonctionnel sera développé au travers d'une ontologie.
- **Définition des ontologies** (illustration par la mise en œuvre industrielle de la section 4.4.2 jusqu'à la section 4.4.7). Elle permet de décrire conceptuellement les objets métiers nécessaires à la définition des concepts fonctionnels. Elle décrit également les liens entre eux. Une ontologie permet de décrire et d'expliquer les concepts sans pour autant « imposer » la façon de les implémenter.

3.4.2.1 Identification des besoins des utilisateurs

L'identification des besoins des utilisateurs passe par une première phase de délimitation du périmètre de l'étude, de l'identification des parties prenantes demandeuses de l'étude ou potentielles qui pourraient en bénéficier. Aussi, la maîtrise de l'environnement de travail est primordiale : enjeux opérationnels, défis organisationnels, applicatifs informatiques utilisés. C'est dans cette situation que le rôle des *Experts Méthodes* est primordial. Ils doivent œuvrer pour recueillir les besoins et les synthétiser, et comparer les pratiques entre les différentes parties. Les avantages de constituer un groupe de travail au sein de la même structure pour la collecte des besoins est de pouvoir confronter les différentes pratiques selon les groupes d'usage (ateliers différents, services), de pouvoir identifier les différences d'interprétation, d'identifier les écarts des pratiques selon les standards, et d'identifier les « contournements » d'usages des applicatifs informatiques selon ces mêmes groupes d'usage. Les *Experts Méthodes* pourront suivre l'évolution des besoins métiers en fonction du temps et assurer la convergence des pratiques ; certes, dans un premier temps ce groupe de travail se positionne sur le recueil des besoins mais, en fonction du temps et en suivant la maturité des projets, les *Experts Méthodes* seront considérés comme les garants de la diffusion des bonnes pratiques entre les différentes parties prenantes.

La criticité dans la collecte des besoins est de savoir écouter les parties prenantes en arrivant à dissocier ce que les utilisateurs cherchent à obtenir idéalement, et non pas par rapport à l'existant, et en particulier les outils utilisés. Nous décrivons ce volet lors de la mise en œuvre industrielle de la méthodologie par le Modèle de Référence dans la section 4.4.1.

3.4.2.2 Définition des scénarios et des concepts fonctionnels leur correspondant

L'identification des besoins utilisateurs est la première étape dans la construction du Modèle de Référence. La deuxième phase consiste à illustrer ce recueil de besoins par des scénarios d'utilisation. Il s'agit de simuler des cas génériques et illustratifs des besoins des utilisateurs. Aussi, ces scénarios reprennent les cas particuliers qui ne rentrent pas dans un cadre standard. L'intérêt de raisonner par scénario est de s'affranchir du langage « très métier » des utilisateurs et d'offrir une meilleure visibilité des contraintes ou besoins à exprimer. La traduction des besoins des utilisateurs en des scénarios d'usage est du ressort des *Experts Méthodes* qui ont mené les études terrain dès le départ. Par leur généricité, les scénarios d'usage peuvent regrouper un ensemble des besoins exprimés. Notons que les cas particuliers sont aussi maintenus afin de leur apporter la meilleure réponse. La vue d'ensemble des scénarios d'usage permet de couvrir l'ensemble des besoins effectifs des utilisateurs.

Suite à la définition des scénarios, et après vérification de leur pertinence et cohérence entre les différents groupes d'usage, le défi maintenant est d'y apporter les meilleures réponses. Là aussi, il s'agit de trouver les solutions fonctionnelles qui répondent parfaitement à ces besoins et qui sont suffisamment génériques pour répondre à l'ensemble des scénarios, et porter une touche de spécificité pour répondre au cas particuliers identifiés / retrouvés dans certains groupes d'usage. C'est à ce niveau que les *Experts Méthodes* et les *Experts IT* se retrouvent pour discuter des meilleures solutions à

proposer. Une des clés du succès lors de la définition des solutions fonctionnelles est de ne pas poser de contraintes techniques. Les arbitrages seront conciliés lors du développement technique.

Pour faciliter la gestion de cette partie et pour avoir une vision d'ensemble, les scénarios proposés et les solutions définies peuvent être représentés par un tableau comme illustré au Tableau 3.1

Tableau 3.1 : *Synthèse des scénarios et correspondance avec les Concepts Fonctionnels (CF)*

Acteurs	Scénarios	CF ₁	CF ₂	...	CF _i	...	CF _n
a ₁ , a ₃	S ₁		X				
a ₁	S ₂		X				
...	...						
a _p	S _j	X					
	...			X			
a _k	S _m				X		

La matrice se compose de trois types de colonnes : les acteurs, les scénarios, et les concepts fonctionnels. Un ou plusieurs acteurs peuvent être responsables pour un scénario donné, tel que c'est le cas du scénario S₁. Aussi, un acteur peut contribuer à plusieurs scénarios comme c'est le cas de l'acteur a₁ qui contribue aux scénarios S₁ et S₂. Les concepts fonctionnels permettent de bâtir les solutions fonctionnelles à apporter pour chaque scénario. Un concept fonctionnel peut couvrir plusieurs scénarios, tel que l'exemple du CF₂ qui couvre les scénarios S₁ et S₂. Par contre, un scénario ne peut être couvert au plus que d'un seul concept fonctionnel. Ainsi, la matrice permet d'associer les groupes d'utilisateurs acteurs des scénarios en question, afin de leur apporter les solutions adéquates au travers des concepts fonctionnels. Nous remarquons qu'un concept fonctionnel peut couvrir plusieurs scénarios. Cependant, un scénario ne peut pas être couvert par plusieurs concepts fonctionnels. En effet, tout l'intérêt de cette phase est de sécuriser de manière fonctionnelle les besoins étudiés. Si un scénario peut être couvert par plusieurs concepts fonctionnels, alors il faudra revoir la pertinence des concepts proposés ou creuser davantage la définition des scénarios. À un autre niveau, la lecture par les *Experts Métiers IT* de la matrice permettra d'évaluer qualitativement la cohérence des concepts fonctionnels en évitant les risques de contradiction ou de contre-performances. La mise à jour des solutions fonctionnelles (suppression, ajout, modification) est établie par le groupe des experts où le consensus est le mot d'ordre. Nous illustrerons nos propos par la mise en œuvre industrielle de la méthodologie par le Modèle de Référence dans la section 4.4.1.

Pour traduire concrètement les concepts fonctionnels, une ontologie leur sera dédiée comme il est expliqué dans la section suivante.

3.4.2.3 Définition d'une ontologie des concepts fonctionnels

Nous faisons appel aux ontologies pour décrire les concepts et pouvoir diffuser la connaissance sur les solutions fonctionnelles. L'intérêt d'une ontologie est qu'elle porte en elle une propriété de flexibilité facilitant leur modification et évolution. L'intérêt d'utiliser les ontologies est de décrire les concepts sans leur imposer un choix d'implémentation. C'est une description indépendante des moyens techniques. La définition des ontologies peut reprendre des concepts déjà présents dans les SI existants, et aussi en

proposer de nouveaux. Le but est de maintenir le cap pour définir une modélisation qui soit la plus proche possible des attentes des métiers. L'ontologie devient ainsi un moyen de partage de la connaissance pour le *groupe d'expert*.

Le défi est de définir une ontologie qui soit à l'image des concepts fonctionnels. Nous devons nous assurer de la cohérence des passages entre les concepts fonctionnels et les concepts des ontologies. Une documentation définissant textuellement les concepts manipulés permettra de soulever davantage tout risque de confusion. Nous définirons plusieurs ontologies lors de la mise en œuvre industrielle de la méthodologie par le Modèle de Référence de la section 4.4.2 jusqu'à la section 4.4.7.

3.5 Conclusion

Ce chapitre présente la méthodologie par le Modèle de Référence pour atteindre un alignement opérationnel dans un environnement complexe et dynamique.

La méthodologie proposée vise, dans un premier temps, à dissocier la vue Métier de la vue IT afin de garantir l'intégrité de l'expression des besoins. Puis, dans un second temps, La méthodologie cherche à synchroniser les deux vues autour du Modèle de Référence. Par une approche incrémentale et itérative, le Modèle de Référence traduit les besoins des utilisateurs, sans être contraint par les solutions informatiques existantes, et définit la cible conceptuelle à atteindre pour le SI.

Nous avons également décrit l'organisation humaine nécessaire pour la construction du Modèle de Référence. Elle consiste à réunir des experts Métiers et des experts de l'IT pour « filtrer » l'expression des besoins, et faire converger les interprétations des concepts métiers et IT manipulés, en mettant l'accent sur l'identification de besoins effectifs des utilisateurs. Enfin, nous avons décrit les étapes nécessaires pour construire le Modèle de Référence partant du recueil des besoins, leur formalisation au travers de scénarios, la définition des concepts fonctionnels constituant les solutions fonctionnelles à ces scénarios, et enfin la définition d'une ontologie.

Notre approche se base sur les préceptes de l'architecture d'entreprise en visant à différencier la couche métier de la couche IT. Aussi, nous avons simplifié l'expression de l'alignement par la définition de la matrice de correspondance entre les concepts fonctionnels et les scénarios, et sans que cela omet la complexité de l'environnement. Nous tenons encore à souligner l'aspect conceptuel du modèle de référence qui permet d'intégrer rapidement les évolutions des besoins métiers, même si ils sont de nature non planifiés.

Nous présenterons dans le chapitre suivant l'application de cette méthodologie sur un cas d'étude industrielle : la processabilité à Crolles300.

Chapitre 4

Mise en œuvre de la méthodologie proposée : étude de la *processabilité*

Ce chapitre développe une étude de cas sur la mise en œuvre industrielle de la méthodologie par le Modèle de Référence présentée dans le chapitre 3. Une première section introduit la notion de *processabilité*, dont la seconde section décrit les éléments « classiques ». La section 4.3 présente l'historique de l'évolution de la *processabilité* à Crolles300. La quatrième section montre comment la méthodologie par le Modèle de Référence a été appliquée. Enfin, la section 4.5 présente les résultats et les apports de la méthodologie.

4.1	La <i>processabilité</i> , définition et enjeux.....	66
4.2	Les éléments « classiques » de la <i>processabilité</i>	66
4.2.1	La qualification	67
4.2.2	La disponibilité des ressources.....	68
4.2.3	Les lots à réaliser	70
4.2.4	Les dérives <i>process</i>	71
4.2.5	Conclusion	72
4.3	Historique de l'évolution de la <i>processabilité</i> pour l'unité de fabrication Colles300 de STMicroelectronics.....	73
4.3.1	Situation initiale et émergence des <i>fab constraints</i>	73
4.3.2	Avantages et inconvénients des <i>fab constraints</i>	76
4.4	Mise en œuvre de la méthodologie par le Modèle de Référence	78
4.4.1	Définition des scénarios et des concepts fonctionnels	79
4.4.2	Remise à plat des éléments existants du MES	84
4.4.3	Modélisation de la qualification.....	88
4.4.4	Modélisation des restrictions des procédés.....	89
4.4.5	Modélisation des critères de qualité.....	93
4.4.6	Modélisation de l'appairage.....	95
4.4.7	Modélisation des campagnes.....	97
4.5	Apports de la méthodologie.....	98
4.6	Conclusion	100

4.1 La *processabilité*, définition et enjeux

Comme décrit au chapitre 1, la fabrication des composants semi-conducteurs suit un processus complexe et critique. Nous soulignons ici la nécessité de maîtriser l'interaction « lot / procédé / équipement » à chaque instant du cycle de fabrication des produits. En particulier dans les unités de fabrication flexibles, où différents produits, à différentes étapes de leur fabrication, sont produits sur les mêmes lignes de production, avec des équipements de différentes générations. La *processabilité* est la réponse à cette interaction qui, pour un couple lot / étape de fabrication, permet de lister l'ensemble des équipements aptes à respecter les exigences de fabrication à l'instant t (ou du point de vue équipement, lister les couples lot / procédé pouvant être réalisés en fonction du temps t). Dans les industries classiques, la notion de *processabilité* n'existe pas, ou se ramène simplement à prendre en compte l'état / les configurations des équipements et au respect de la gamme de fabrication. Cependant, en fabrication de semi-conducteurs, la construction d'une information fiable sur la *processabilité* impacte directement la gestion des lignes de production (Fu, et al., 2010) (Rowshannahad, et al., 2015) : Le caractère dynamique de la *processabilité* permet de garantir une adéquation acceptable entre qualité des produits et capacité de la ligne de production, et par conséquent, une meilleure maîtrise des coûts de production. L'information sur la *processabilité* devient encore plus cruciale dans les unités de fabrication à mix produit important où plusieurs centaines de références produits peuvent être fabriqués en parallèle, comme c'est le cas pour l'unité de fabrication Crolles300. Cette spécificité des unités de production à forte diversité de produits pourrait expliquer, et en dépit de l'importance de la *processabilité*, le faible nombre de travaux tenant compte de la *processabilité* pour les modèles de planification ; voir (Fu, et al., 2010) pour une revue de littérature des modèles de planification. Et même les rares études faisant référence à la *processabilité* (Fu, et al., 2010) (Johnzén, et al., 2011) (Rowshannahad, et al., 2015), ne cherchent pas à définir ses éléments constitutifs et la considèrent comme un résultat binaire.

La *processabilité* est le résultat de l'interaction de plusieurs parties prenantes de métiers différents. Avec l'automatisation des moyens de production et leur pilotage informatique, il devient d'une part difficile d'identifier les éléments intervenant dans la définition de la *processabilité*, et d'autre part, la *processabilité* acquiert une importance supplémentaire pour l'optimisation de la gestion de production. En effet, une mauvaise qualité sur l'information de la *processabilité* perturbe la production avec des risques de limitations injustifiées de la capacité de production. Les travaux de (Johnzén, et al., 2011) (Mönch, et al., 2011) (Kabak, et al., 2013) soulignent l'importance des impacts économiques liés à une mauvaise gestion de la *processabilité*. Aussi, pour éviter de tels inconvénients, cette dernière doit pouvoir alimenter différents systèmes pour la gestion de production tel que pour l'ordonnancement, la planification, etc.

Dans ce qui suit, nous identifierons et définirons les éléments permettant de construire une information complète sur la *processabilité*.

4.2 Les éléments « classiques » de la *processabilité*

Dans ce paragraphe, nous décrivons la logique permettant de définir précisément la *processabilité*. Cette description est valide pour tous les fabricants de semi-conducteurs quels que soient les volumes ou le *mix* (diversité) des produits à fabriquer. La spécificité pour les unités à forte diversité de produits réside dans l'évolution continue des technologies et l'hétérogénéité des équipements. Par conséquent, le paramétrage des règles de la *processabilité* est plus complexe vu le nombre important des paramètres à prendre en compte, et la fréquente introduction de nouvelles règles.

D'un point de vue modélisation, les éléments de la *processabilité* sont :

- **La qualification** : processus nécessaire pour qu'une machine soit certifiée apte à réaliser une opération donnée,
- **La disponibilité des ressources** : il s'agit de disposer d'une organisation (humaine et matérielle) adéquate pour satisfaire les besoins de la production,
- **Les produits à réaliser** : le type / criticité des lots à produire peuvent orienter le choix des équipements à utiliser,
- **Les dérives du processus de production** : l'origine d'une défaillance peut être une dérive des paramètres de l'équipement, des paramètres du produit, ou les deux simultanément.

Bien que cette classification soit générique pour les fabricants de semi-conducteurs, notre étude est fortement imprégnée de l'analyse terrain de l'unité de production avancée Crolles300 de notre partenaire industriel STMicroelectronics. Dans un objectif de simplification, nous modéliserons les éléments classiques de la *processabilité* par des diagrammes de classes. En effet, cette modélisation permet d'explicitier et de représenter en partie le SI actuel⁸.

Dans les paragraphes suivants, nous détaillerons ces éléments classiques de la *processabilité*.

4.2.1 La qualification

Chaque équipement est « théoriquement » susceptible de réaliser une ou plusieurs opérations de la gamme de fabrication (ou route du produit). Pour concrétiser cette aptitude, un processus de qualification certifie un équipement pour l'ensemble des opérations qu'il doit réaliser. Cette notion de qualification octroie à l'équipement l'autorisation de lancer la production des lots pour ces opérations. C'est un processus long et coûteux qui peut dans certains cas durer plusieurs semaines, et réclamer plusieurs essais et calibrages réalisés par un groupe d'experts pour statuer sur cette « certification ». Idéalement, tous les équipements devraient être qualifiés pour toutes les opérations afin de gagner en flexibilité et en capacité de production. Cependant, l'usage de milliers de recettes, comme c'est le cas dans les unités de fabrication à mix produits important, rend cet objectif économiquement irréalisable.

Concrètement, le processus de qualification évalue la capacité de l'équipement à réaliser les transformations physiques attendues sur les plaquettes. Ces transformations sont consignées dans les recettes qui définissent les paramètres physiques à appliquer ou contrôler. Par exemple, une recette spécifie le mélange des gaz à utiliser et leurs proportions respectives, leurs pressions, la température à

⁸ Les modélisations proposées seront reprises telles quelles dans le modèle de référence dans le paragraphe 4.4 car elles sont compréhensibles côté utilisateur.

appliquer et la durée pour chaque étape élémentaire de fabrication, etc. Les spécifications en termes de contrôle des recettes et d'attente qualité varient en fonction des exigences du produit. Par exemple, on n'aura pas forcément les mêmes exigences pour les opérations de contrôle périodique d'un équipement (utilisation des plaquettes de type « *Non Product Wafer* ») ou la réalisation d'une étape critique pour un produit « client ». Il faut également noter l'influence des normes et certifications qualité qui imposent elles aussi des contraintes spécifiques comme c'est le cas par exemple des produits destinés au secteur automobile.

Notons qu'une recette peut être utilisée sur plusieurs équipements et qu'un équipement peut réaliser plusieurs recettes comme illustré sur la Figure 4.1.

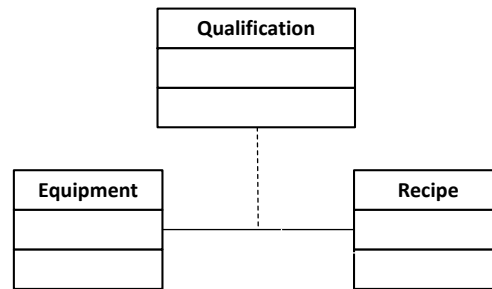


Figure 4.1 : Schématisation de la qualification

En microélectronique, il est souvent fait usage de machines comprenant plusieurs modules de process. Dans ce cas, chaque machine avec l'ensemble de ses modules doit être qualifiée. Nous avons opté, pour des raisons de simplification, d'assimiler cet ensemble par la classe « *Equipment* ». La décision de qualification ou pas d'un couple (machine/module, recette) est portée par la classe association « *Qualification* ».

Pour maintenir la qualification d'un équipement, la recette en question doit être utilisée à minima. A titre indicatif, l'absence de passage de lots avec cette recette au-delà d'une certaine période (par exemple une année) annule la qualification. Aussi, à la suite de chaque intervention de maintenance, l'équipement est mis sous surveillance par une revue de qualification. Nous pouvons également rencontrer des cas où, en fonction du temps, les performances de l'équipement se dégradent, le rendant ainsi incapable de satisfaire les paramètres pour lesquels il a été qualifié initialement : la décision est donc d'annuler la qualification.

Vu l'importance de la qualification et ses impacts (sur l'ordonnancement, la capacité de production, la qualité de la planification, etc.), les systèmes d'information industriels doivent prendre en compte cette information, la partager entre les différents modules de gestion de production et permettre de suivre son évolution (mise à jour, modifications) dans le temps.

4.2.2 La disponibilité des ressources

La disponibilité des ressources contribue à statuer sur la *processabilité*. Tenant compte des aspects logistiques, l'évaluation des ressources humaines et matérielles permet de mieux maîtriser la *processabilité* et de pouvoir projeter son évaluation dans le temps. Nous avons identifié les ressources suivantes :

- **Les ressources humaines.** Le passage à l'automatisation pour les moyens de manutention, pour l'application des recettes, pour la supervision des procédés de fabrication, etc. a permis à la fois d'augmenter les cadences de production et de sécuriser les tâches critiques. Néanmoins, la dimension humaine demeure importante et cruciale, notamment pour la gestion des cas particuliers / non pris en compte par l'automation. L'intervention humaine est nécessaire pour le traitement de tous les scénarios « non standards » et les opérateurs gèrent un périmètre équipement pour tout ce qui est interventions maintenance et prise en compte des alertes de la supervision (gestion des alarmes, réglage *process*, etc.). Ces actions requièrent différents niveaux de qualification pour lesquels les opérateurs sont formés et certifiés.
- **Les équipements.** Ils constituent le support physique permettant de réaliser les procédés de fabrication. Par rapport à la *processabilité*, nous distinguons deux aspects à prendre en compte pour les équipements. D'abord, les équipements doivent être dans un état leur permettant de satisfaire les spécifications des procédés. Et en second lieu, la *processabilité* doit prendre en compte la disponibilité de l'équipement (pannes et interventions de maintenance diverses, alarmes SPC, expérimentations R&D et autres opérations engineering).
- **Les consommables.** C'est la partie permettant de fournir tous les éléments nécessaires aux opérations de transformation sur les équipements. Cela regroupe les produits chimiques, les gaz, les jeux de masques (nécessaires en particulier dans les opérations critiques de photolithographie), etc. L'absence de ces éléments affecte directement la *processabilité* avec un impact financier important sur les coûts de production. Une gestion de stock efficace permettra de définir le juste équilibre entre les immobilisations matérielles et les conséquences sur l'activité de production, d'où l'intérêt du partage d'information.
- **Le système de transport automatisé.** La logistique interne (transport et stockage des lots entre étapes) doit être en cohérence avec les besoins de la production. Les contraintes de la première peuvent conduire à contraindre les opérations de fabrication (par exemple risque de dégradation de la qualité du produit suite à une longue attente entre deux opérations), d'où l'intérêt d'aligner la logistique avec le système de pilotage de la production (*Manufacturing Execution System*) (Kiba, et al., 2009).

Nous modélisons la disponibilité des ressources par le diagramme de classes dans la Figure 4.2.

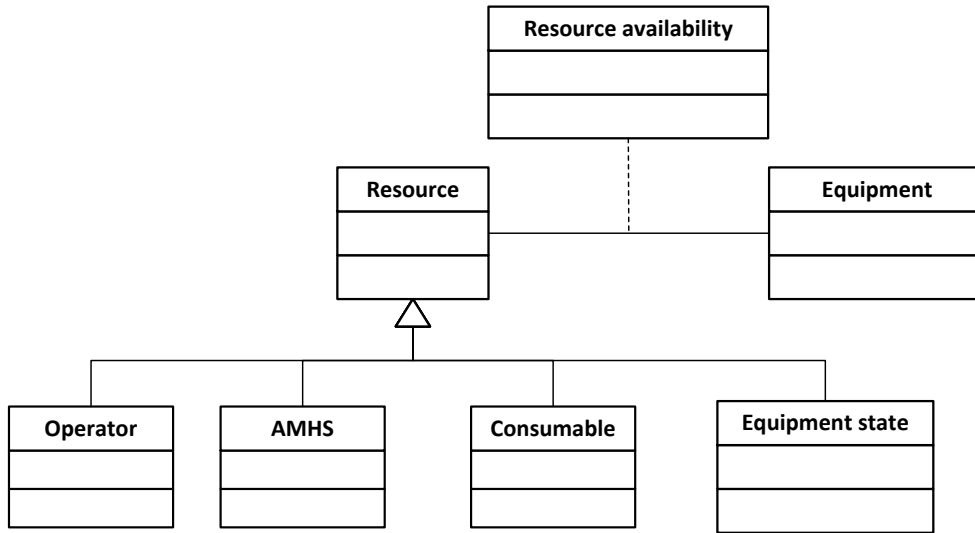


Figure 4.2 : Schématisation de la disponibilité des ressources

Dans le modèle de la Figure 4.2, nous généralisons les ressources *opérateurs*, *système de transport*, et *consommable* sous la classe « *Ressource* ». La disponibilité de ces ressources est à évaluer pour chaque *équipement*, d'où la classe association « *Resource availability* » pour statuer sur leur état. En effet, une *ressource* peut être partagée entre différents *équipements*, et chaque *équipement* sollicite au moins une *ressource*. Notons également que chaque *équipement* peut avoir plusieurs *états* (en maintenance, en attente, en production, etc.), où ces *états* peuvent être interprétés comme une *ressource* pour l'équipement en question. Ainsi, l'état équipement est généralisé sous la classe « *Ressource* ».

4.2.3 Les lots à réaliser

L'évaluation de la *processabilité* doit aussi prendre en compte le type de lots qui seront fabriqués. Également, il faut tenir compte de la compatibilité entre ces types et les états équipement. Généralement dans les autres industries, cette notion de compatibilité ne se pose pas et se limite à prendre en compte l'état de maintenance de l'équipement. Nous listons ci-dessous les principaux types de lot utilisés à l'unité de fabrication avancée Crolles300 :

- **Les lots de production.** C'est la catégorie la plus importante en termes de volume. Elle regroupe les produits qui sont destinés à un client « externe ».
- **Les lots d'ingénierie.** Ils sont utilisés lors du processus de qualification des équipements afin de conduire les tests et réglages nécessaires. Aussi, ils sont utilisés pour améliorer la performance des procédés pour gagner en robustesse et en rendement.
- **Les lots R&D.** Comparables aux lots de production, les lots R&D sont utilisés pour le développement de nouvelles technologies. Ils se caractérisent par des possibilités de paramétrage plus souples en termes de choix et de configuration des recettes à utiliser.
- **Les lots de « supervision ».** L'appellation utilisée est aussi les lots *NPW (Non Productive Wafers)*. Ils sont utilisés pour vérifier l'état des équipements. Ces lots sont principalement utilisés à la suite des

interventions maintenance pour statuer sur l'aptitude des équipements à reprendre la production, ou durant les contrôles périodiques des équipements.

Cette configuration est synthétisée par le schéma de la Figure 4.3.

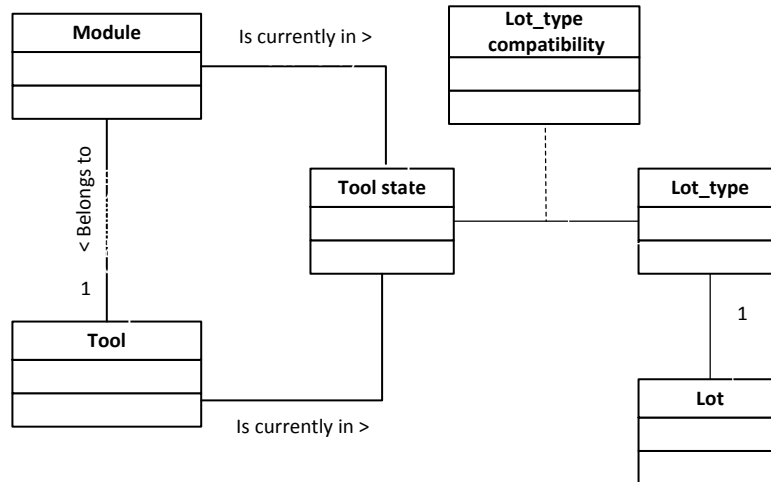


Figure 4.3 : Modèle de données pour la gestion de la compatibilité Lot / état équipement

La classe « Equipment » est traduite par l'association entre les modules et la machine. Ces derniers peuvent avoir simultanément des états différents, d'où l'association propre entre l'état et le module d'une part, et l'association entre l'état et la machine d'autre part. Notons que pour des raisons de simplification de la lecture, nous avons omis la classe association de l'évolution des états module / machine en fonction du temps. Pour chaque état équipement, la compatibilité est définie par la classe association avec le type de lot. La classe de cette dernière regroupe les lots qui lui sont rattachés : un lot ne peut avoir au maximum qu'un seul type.

Nous tenons à souligner qu'au-delà de l'impératif de la qualification exigée par le client, ce dernier peut aussi imposer des aspects qualité supplémentaires. A titre d'exemple, certains produits, pour certaines de leurs étapes critiques de fabrication, ne peuvent être réalisés que sur des équipements proposant un seuil minimal de performance. Le challenge pour la production est alors d'identifier les équipements satisfaisant ces exigences : ces équipements sont alors définis comme « *golden tools* ». Ce qualificatif évidemment n'est pas définitif, car les performances des équipements évoluent en fonction du temps.

4.2.4 Les dérives *process*

La qualification d'une recette pour un équipement est une condition nécessaire mais pas suffisante pour statuer sur la *processabilité*. Le périmètre d'une qualification peut être réduit, en interdisant temporairement certaines étapes des routes (gammes de fabrication) sur lesquelles la recette est utilisée. Lorsqu'un problème est détecté sur un wafer (ou plaquette), un lot, ou un équipement (grâce aux outils classiques de SPC, FDC, ou toute autre technique avancée de maîtrise des procédés), les excursions sont analysées afin d'identifier la cause principale de l'anomalie. Cette action

nécessite de suspendre momentanément l'usage de l'équipement (ou d'un ou plusieurs de ses modules) le temps de corriger l'anomalie. Selon la complexité du problème, plusieurs acteurs peuvent intervenir pour identifier l'origine du dysfonctionnement, action qui peut durer dans le temps : d'où l'intérêt de pouvoir tracer les interventions et de pouvoir remettre l'équipement en production en s'assurant d'avoir éliminé toutes les causes potentielles de la dérive. Nous synthétisons cette description dans la Figure 4.4.

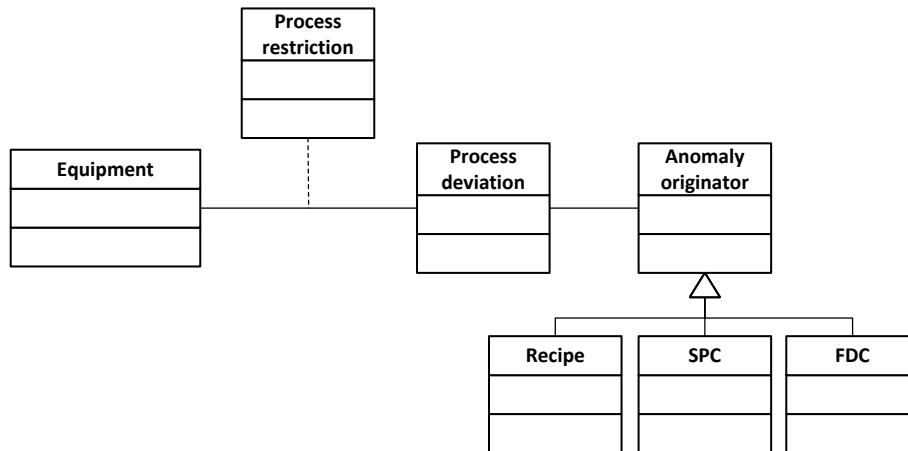


Figure 4.4 : Schématisation des dérives process

Dans la Figure 4.4, nous reportons l'impact des *dérives process* sur l'équipement. Chaque *équipement* peut subir une ou plusieurs *dérives process*, et de même, une même *dérive* (contamination mesurée à l'étape N mais pouvant avoir été causée à l'étape N-x par exemple) peut impacter plusieurs *équipements*. Ainsi, la décision de restreindre le *process* est portée par la classe association « *Process restriction* ». Notons que plusieurs sources peuvent être à l'origine d'une *dérive process*, et qu'une *dérive process* peut être la conséquence de la combinaison de plusieurs facteurs, d'où l'association binaire entre les classes « *Process deviation* » et « *Anomaly originator* ». Cette dernière classe a été pensée comme une *généralisation* de plusieurs facteurs pouvant être à l'origine d'une *dérive process* telles que les alarmes FDC ou SPC ou encore la nature même des procédés mis en œuvre (usage de certains types de recettes par exemple). Évidemment, la classe « *Anomaly originator* » pourra porter d'autres spécialisations autres que celles mentionnées dans la Figure 4.4.

4.2.5 Conclusion

L'automatisation des moyens de production et leur pilotage informatique donnent à la *processabilité* une importance particulière avec la nécessité de disposer d'une information fiable pour toutes les parties prenantes. L'évolution des règles métiers de la *processabilité* et la dynamique de la fabrication des semi-conducteurs rend sa gestion difficile, avec des risques de limitation de la capacité de production avec des impacts économiques importants dus à la perturbation des lignes de production (Johnzén, et al., 2011) (Mönch, et al., 2011) (Kabak, et al., 2013). Or, son évaluation impose une coordination entre différents acteurs et différentes organisations (production, maintenance, procédés, qualité, etc.). Comme synthèse, nous assemblons les différentes modélisations des éléments classiques de la *processabilité* dans la Figure 4.5. Cet assemblage permet une description complète de la

processabilité, et de comprendre ses concepts : nous la considérons comme une ontologie de la *processabilité*.

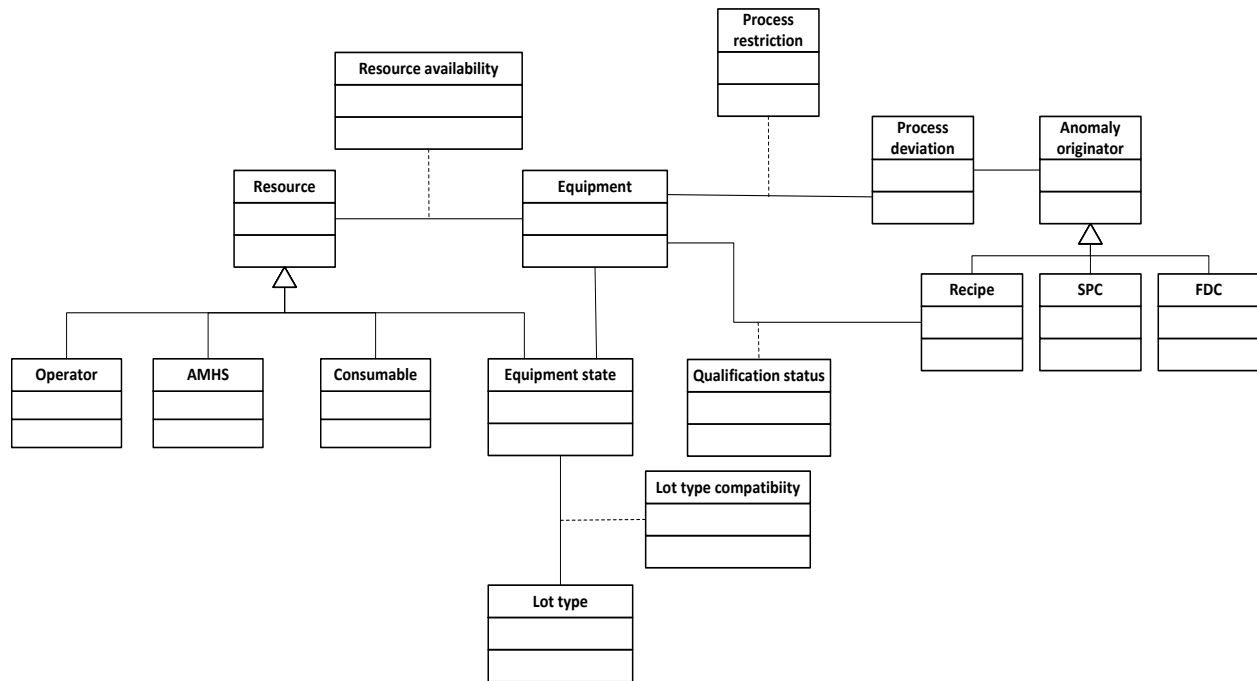


Figure 4.5 : Ontologie des éléments classiques de la processabilité

La lecture de la Figure 4.5 nous aide à mieux cerner la complexité de la *processabilité*. Par exemple, l'état de l'équipement contribue à l'évaluation de la *processabilité* par sa disponibilité comme étant une ressource, et aussi par sa compatibilité par rapport au type de lot à produire. De même, la *recette* à utiliser peut impacter la *processabilité* par l'état des *qualifications* ou par les *dérives process*.

Le challenge face à la *processabilité* est d'arriver à partager son évaluation entre les différentes organisations tout en maîtrisant son évolution. La clé du succès réside dans son intégration au système d'information tout en garantissant les moyens de supporter son évolution.

Dans le paragraphe suivant, nous présenterons la façon dont l'évolution de la *processabilité* a été gérée dans l'unité de fabrication Crolles300.

4.3 Historique de l'évolution de la *processabilité* pour l'unité de fabrication Colles300 de STMicroelectronics

4.3.1 Situation initiale et émergence des *fab constraints*

La fabrication des semi-conducteurs se caractérise par le rythme effréné de renouvellement des nouvelles technologies. Pour le système de production, la dynamique des changements et sa complexité s'inscrivent alors dans le quotidien des opérationnels. Concernant la *processabilité*, les évolutions sont à

la fois portées par le paramétrage de nouvelles règles et par l'introduction de nouveaux éléments définissant la *processabilité*. Dans le contexte de l'automatisation, la capacité à intégrer facilement les évolutions de la *processabilité* au système d'information constitue un avantage compétitif (optimisation de la planification, de la capacité de production, etc.).

Lors de la création du système d'information pour l'unité de fabrication avancée Crolles300 de STMicroelectronics, la *processabilité* était gérée par les outils suivants :

- MES : Crolles300 utilise le logiciel *300Works* proposé par *Applied Materials*. Il assure le suivi de l'avancement des lots, il prend également en compte les aspects logistiques liés à la disponibilité des ressources. Quant à la gamme de production, il gère la *processabilité* par les éléments suivants :
 - La recette : définit les paramètres de transformation physique lors du passage du lot sur l'équipement.
 - L'identifiant du process : détermine les consignes (séquence d'étapes physique élémentaires internes) que l'équipement doit suivre afin de garantir les paramètres de la recette en question.
 - La *capabilité* : elle fait le lien logique entre les machines et les technologies. Chaque étape « process » de la route (brique, niveau, etc.) fait appel à une *capabilité*. Chaque équipement a une ou plusieurs *capabilité* « actives » à l'instant t. Notion plus volatile que la qualification et indépendante de cette dernière (un équipement peut être « qualifié » alors que sa *capabilité* est dévalidée), la *capabilité* autorise le passage du lot sur l'équipement.

Nous remarquons déjà dans cette configuration l'absence d'un élément identifiant clairement l'entité de qualification (malgré l'usage de la recette).

- CMMS (*Computerized Maintenance Management System*, système informatisé de gestion de la maintenance) : *Xsite* est l'outil utilisé à STMicroelectronics et est également fourni par *Applied Materials*. *Xsite* est très intégrée au MES (gestion automatique des transitions d'états équipement via les « *state rules* »).

Pour gérer l'arrivée de nouveaux produits et l'introduction de nouvelles technologies à Crolles300, l'intégration des nouveaux paramètres et éléments de la *processabilité* a été établie en rajoutant une couche supplémentaire (appelé *fab constraints*) au MES. En effet, les éléments initiaux du MES « la recette, l'identifiant du process, et la *capabilité* » n'étaient plus suffisamment discriminants. La contrainte de coût et l'impératif de livrer rapidement une solution ont mené à traduire tout nouveau besoin de la *processabilité* par un codage libre en SQL.

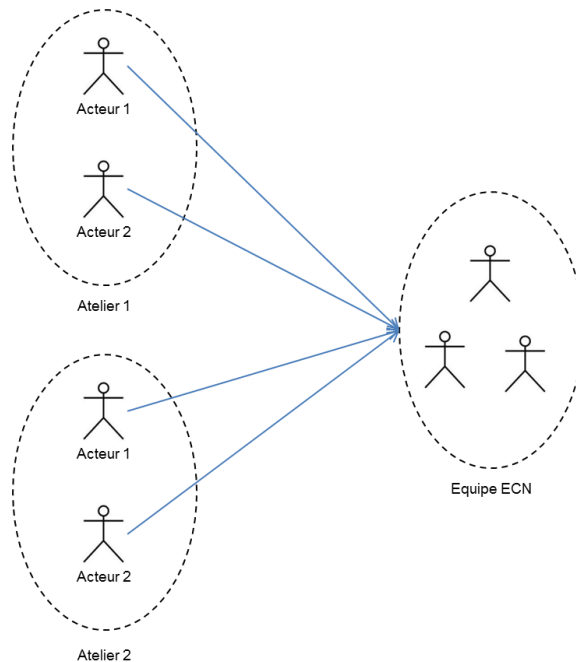
Les *fab constraints* permettent de gérer l'autorisation de passage des lots sur les équipements selon une logique d'interdiction ou d'autorisation (seulement 3% du nombre des requêtes), avec la possibilité de désactiver leurs actions. L'évaluation des *fab constraints* est assurée par le MES au moment du lancement du lot (« *job prep* ») en prenant en compte son contexte actuel. Une *fab constraint* est rattachée à un équipement et uniquement à un seul équipement. Elle comporte une description de la raison de sa création avec le codage de son périmètre d'impact. Le Tableau 4.1 illustre un exemple de *fab constraints* :

Tableau 4.1 : *Exemple de fab constraints*

Equipement	Description	Expression
QS93001	EQP_QS93001_058 - Layer ETCH LIN* et HM* - Techno C028 interdits	(FABLOTEXT.RECIPENAME LIKE '%LIN%-ET%' OR FABLOTEXT.RECIPENAME LIKE '%HML%-ET%' OR FABLOTEXT.RECIPENAME LIKE '%HMX%-ET%') AND EXISTS (SELECT 1 FROM C2_PROCESSPLANCONF, FWPROCESSPLAN where FWLOT.PLANNAME=FWPROCESSPLAN.NAME AND FWPROCESSPLAN.SYSID=C2_PROCESSPLANCONF.PARENT AND C2_PROCESSPLANCONF.TECHNO_NUM = ('028'))

Cette *fab constraint* interdit le passage de tous les lots sur l'équipement QS93001 pour les niveaux de gravure en LIN et en HM. Nous reviendrons plus en détails sur son explication dans le paragraphe suivant.

La création d'une *fab constraint* est gérée via le processus ECN (« *Engineering Change Notice* »). Le schéma de création est direct : l'équipe informatique chargée de la mise en place (codage) des ECN centralise les demandes pour y apporter la meilleure réponse dans les meilleurs délais. A titre illustratif, nous schématisons cette situation dans la Figure 4.6.

Figure 4.6 : *Schéma de définition et de mise en place des fab constraints*

Chaque atelier émet ses propres demandes pour la création des *fab constraints*, qui sont suivies des cas exprimés par des acteurs différents au sein de la même entité (sans passer forcément par une revue métier par acteurs entre les différents ateliers, ou même au sein du même atelier). Bien que l'équipe ECN prenne en charge la « négociation » des besoins exprimés, le nombre important des

demandes et leur évolution ont fait que le suivi et la vérification de la pertinence des demandes sont devenus peu contrôlables : l'absence d'un processus clair de gestion des *fab constraints* dilue les responsabilités et mène à la perte de connaissances sur la pertinence de leur mise en place. Nous reviendrons davantage sur les conséquences de cette situation dans le paragraphe suivant. Nous mettons ainsi à jour l'ontologie de la *processabilité* dans la Figure 4.7.

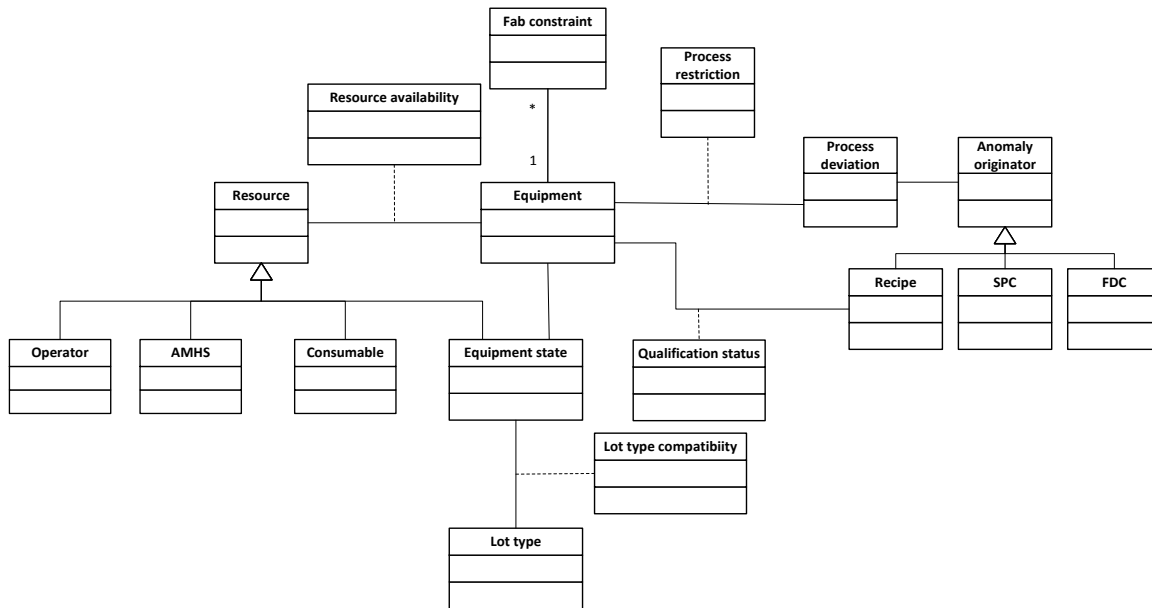


Figure 4.7 : Mise à jour de l'ontologie de la processabilité avec la mise en place des *fab constraints*

Dans la Figure 4.7, la mise en place des *fab constraints* s'est traduite en rattachant directement ce nouveau concept aux équipements. Les *fab constraints* se sont imposées comme un nouvel élément de la *processabilité* sans que leur rôle fonctionnel soit clairement défini (tout nouveau besoin est quasi systématiquement intégré via ces dernières).

La prise en compte des nouveaux besoins de la *processabilité* par du codage SQL était intéressant au départ et apportait une solution satisfaisante. Cependant, l'accroissement de leur nombre à plus de 1300 a soulevé d'autres problématiques. Nous discuterons les avantages et inconvénients des *fab constraints* dans le paragraphe suivant.

4.3.2 Avantages et inconvénients des *fab constraints*

Il est indéniable que l'implémentation des *fab constraints* par du codage SQL permettait de répondre rapidement aux nouveaux besoins de la *processabilité* et dans des délais non pénalisants pour les activités de la production. Cette implémentation offrait une souplesse pour couvrir tous les besoins, tout en préservant au MES la fonctionnalité du suivi de la production. Les opérationnels disposaient ainsi d'une solution garantissant la prise en compte de la complexité de leurs besoins et le suivi dynamique de leur évolution. Par exemple, il était devenu possible d'interdire le passage d'un lot sur l'équipement E_2

tant que l'équipement E_1 était disponible (l'équipement E_1 est « préféré » à l'équipement E_2). Aussi, il était possible d'orienter le passage des lots sur un équipement en particulier dans un atelier A_1 en fonction de l'équipement utilisé précédemment dans l'atelier A_2 .

Bien que les *fab constraints* aient été centralisées au niveau du MES, elles n'ont pas été partagées avec les autres systèmes (calcul capacité de production, système de dispatching / ordonnancement, système de planification, etc.) pénalisant potentiellement la performance de la production (pas d'optimisation globale). De plus, la nature non « prévisible » des *fab constraints* (évaluables uniquement lors du lancement du lot sur un équipement) affecte la qualité de de projection de ces systèmes. Sur un niveau encore plus opérationnel, les utilisateurs ne disposent pas d'une vision sur l'état d'activation ou pas des *fab constraints* (vérifiables uniquement lors du lancement du lot sur l'équipement) : c'est un coût supplémentaire pour la production (allocation de ressource AMHS, temps de manutention du lot, coût pour choisir un autre lot processable, etc.). Avec un nombre sans cesse croissant de *fab constraints* (plus de 1300 au début de notre étude), il est devenu de plus en plus difficile de cerner l'étendue de leur périmètre d'interdiction. Reprenons la *fab constraint* décrite dans le Tableau 4.1. Elle interdit, pour l'équipement QS93001, tous les niveaux de gravure en « LIN » et en « HM » de la technologie C028 (c'est une technologie CMOS avec une largeur de grille de 28nm, nous parlerons de nœud technologique). Or, le script mentionnait l'interdiction du nœud technologique « 028 » sans référence au type de la technologie. De ce fait, le périmètre d'interdiction couvre toutes les technologies (de largeur de grille de 28nm) qu'elles soient CMOS ou non, bien que la description de la *fab constraint* mentionne clairement la C028. Deux interprétations sont alors possibles : (i) S'agit-il d'une faille lors de la transcription des besoins ou lors du codage ? (ii) Est-ce un choix délibéré des services informatiques d'étendre le périmètre ? Nous pouvons supposer que le choix d'implémentation par le nœud technologique est évident vu qu'il n'existe qu'une seule technologie en 28nm qui est la technologie CMOS. Le risque est alors que cette *fab constraint* restreigne automatiquement d'autres technologies du même nœud dans le futur. En effet, il ne paraît pas simple de retrouver la *fab constraint* en question pour y apporter les modifications nécessaires, de plus qu'il n'existe pas une organisation claire pour leur mise à jour. En outre, il devient difficile de lever les « incohérences / contradictions » entre les besoins exprimés et le codage réalisé vu que le contexte de spécification n'est pas rigoureusement mentionné (contexte déclencheur à l'origine de la création de la *fab constraint*, par quelle équipe, canevas de formulation, etc.). Encore sur l'exemple de la *fab constraint* du Tableau 4.1., l'interdiction des niveaux de gravure se fait à l'aide du caractère générique « % » (« *wild card* »). Nous tombons dans le même cas de figure que pour la mise en place de nouvelles technologies : tout nouvel élément intégré à la route sera systématiquement interdit sans avoir une justification ou une traçabilité de l'action. Pour terminer avec cet exemple, nous remarquons qu'il y a un déphasage entre les concepts manipulés sur le terrain (besoin d'interdiction de *niveau*) et les objets métiers manipulés informatiquement (les recettes). Cette situation accentue l'écart de compréhension (entre les opérationnels et les informaticiens) et risque de « noyer » la signification fonctionnelle dans le code SQL. Sachant que les éléments de la *processabilité* n'ont pas évolué dans le MES, les utilisateurs se trouvent à exprimer leurs besoins en se référant aux entités existantes. Par exemple, se baser sur la capacité et le niveau (au travers des recettes !) pour intervenir sur l'état des qualifications ! La situation acquiert une complexité supplémentaire si on se réfère à la multitude des acteurs exprimant des besoins d'interdiction qu'ils proviennent d'un même atelier, ou pire

encore, d'ateliers différents. Nous avons rencontré des cas où les besoins d'interdiction étaient similaires au sein d'un même atelier (mais appliqués à différents équipements), mais où vu l'absence de centralisation, l'équipe ECN a reçu des descriptions différentes et a par conséquent mis en place des solutions différentes alors que le besoin initial / effectif était unique. Le même scénario se reproduit en inter-ateliers où chacun apporte sa propre description ce qui conduit à des différences d'implémentation alors que, fonctionnellement, le besoin était unique (évidemment en gardant les spécificités des besoins de chaque atelier). De plus, les *fab constraints* doivent être dupliquées pour chaque équipement même si le besoin est identique : on crée alors autant de *fab constraints* différentes qu'on a d'équipements impactés. L'exemple du Tableau 4.2 illustre cette situation.

Tableau 4.2 : Illustration de la redondance des *fab constraints*

Equipement	Description	Expression
L248C04	Masque < 1A24A interdit sauf techno I140	(SUBSTR(FABLOTEXT.RETICLEFAMILY,1,5) < '1A24A' and SUBSTR(FABLOTEXT.RETICLEFAMILY,1,5) not like '140%')
L248C05	Masque < 1A24A interdit sauf techno I140	(SUBSTR(FABLOTEXT.RETICLEFAMILY,1,5) < '1A24A' and SUBSTR(FABLOTEXT.RETICLEFAMILY,1,5) not like '140%')

Les *fab constraints* du Tableau 4.2 interdisent le passage des lots utilisant des références de masques antérieurs à la référence « 1A24A », sauf si le lot est sur la route d'une technologie « I140 ». Pour appliquer cette règle sur les équipements « L248C04 » et « L248C05 », la *fab constraint* a été dupliquée. De la sorte, le nombre des *fab constraints* a dépassé les 1 300 rendant même critique le temps d'exécution du MES (contexte de fabrication entièrement automatisé).

Avec cette implémentation, la gestion des *fab constraints* est devenu critique : la perte du sens fonctionnel affectait à la fois leur manipulation (décision d'activation ou pas) et leur évolution (décision de modification ou de suppression). De plus, le périmètre d'interdiction est devenu très difficile à évaluer (sauf pour les experts du modèle MES). Ainsi, le contexte d'usage des *fab constraints* bloque leur évolution, même si elles apportent toujours le même niveau de flexibilité initiale : l'écart entre les attentes métier et la réalité informatique ne cessait de se creuser. Pour remédier à cette situation de blocage, nous apporterons, dans ce qui suit, notre solution en appliquant la méthodologie par le Modèle de Référence.

4.4 Mise en œuvre de la méthodologie par le Modèle de Référence

La situation de blocage de la *processabilité* avec les *fab constraints* (que ce soit pour leur gestion ou leur évolution) a directement impacté la qualité des prévisions des systèmes de planification ainsi que le calcul de la capacité de l'unité production de Crolles300. La construction de nouveaux éléments de la *processabilité* par les *fab constraints* en remaniant / poussant les limites des concepts existants du MES

(la recette, l'identifiant du procédé, la capacité) a fini à la fois par (i) « formater » la façon dont raisonnent les opérationnels pour exprimer leur besoin (en se référant toujours aux systèmes existants) et (ii) brouiller l'évolution de la trajectoire d'évolution de la *processabilité* (perte du sens fonctionnel). Dans ce paragraphe, nous mettons à plat les *fab constraints* en nous basant sur la méthodologie par le Modèle de Référence afin d'aligner la vision métier et la vision IT sur la *processabilité*. Pour cela, nous présentons l'organisation du projet et nous définissons une nouvelle classification des éléments de la *processabilité*.

4.4.1 Définition des scénarios et des concepts fonctionnels

Pour la mise en place d'un Modèle de Référence intégrant les *fab constraints* pour la *processabilité*, nous nous référons aux recommandations décrites dans la section 3.4.1, et nous proposons une organisation du projet. Une équipe projet est construite pour couvrir les aspects métiers et informatiques : elle se compose des *Experts Méthodes* et des *Experts IT*. Le rôle des *Experts Méthodes* est de regrouper les demandes des opérationnels par atelier, et de mener une étude comparative entre les différents ateliers. L'objectif est de retrouver les besoins effectifs des utilisateurs et d'offrir la vision la plus générique possible, tout en préservant les spécificités métiers de chaque atelier. Ainsi, les *Experts Méthodes* ont mené une étude de terrain pour comprendre la signification des *fab constraints* en les comparant au code SQL. Les *Experts IT* ont contribué à cette analyse et ont aussi soulevé des interrogations sur le fondement de plusieurs *fab constraints*. La synthèse des échanges entre les deux groupes d'experts a permis de définir le Modèle de Référence pour la *processabilité*. Ce modèle intègre tout le contenu fonctionnel des *fab constraints*. Ainsi, l'action du Modèle de Référence et le rôle du groupe d'experts se positionnent comme un facilitateur et un « fédérateur/organisateur » pour la gestion de la *processabilité* (définition des besoins, mise à jour, etc.). La Figure 4.8 illustre la nouvelle organisation par rapport à la Figure 4.6 pour la sécurisation et la centralisation des besoins de la *processabilité*, et pour la cohérence des solutions informatiques proposées.

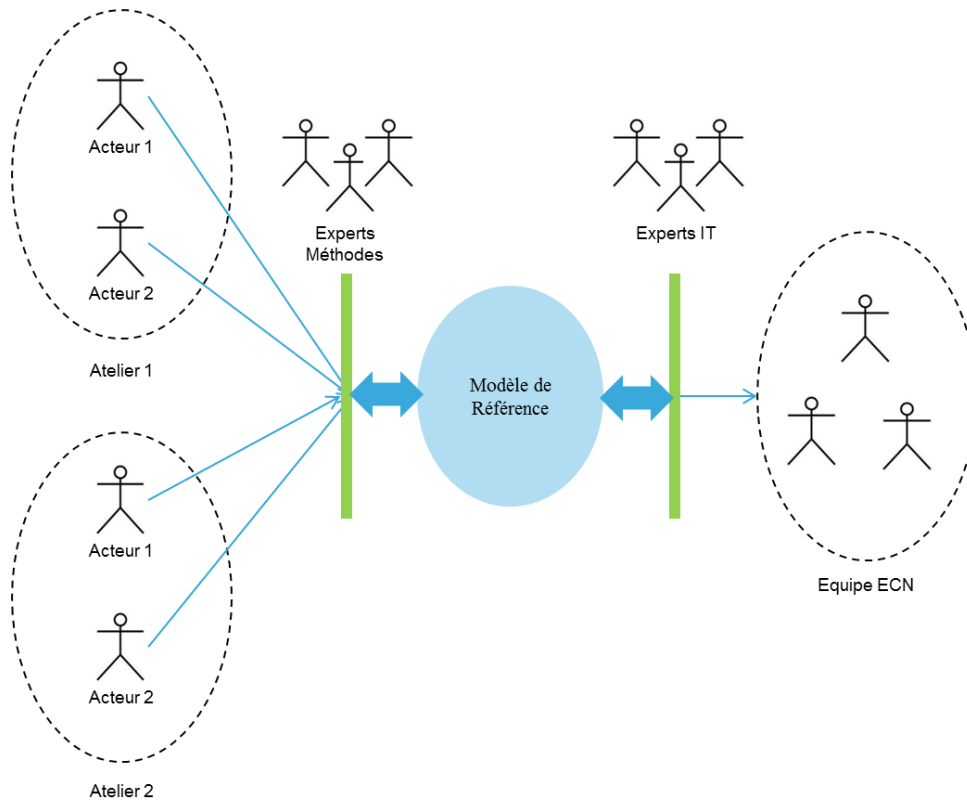


Figure 4.8 : Nouveau schéma de définition et de mise en place des *fab constraints* avec le modèle de référence

Deux « filtres », pilotés par chaque groupe d'experts, délimitent le Modèle de Référence. L'action des filtres est d'assurer la cohérence entre la vision métier et la vision IT. Nous exposerons les résultats du Modèle de Référence pour la *processabilité*. Pour une meilleure lecture, nous avons organisé les résultats par les livrables du Modèle de Référence (et par famille fonctionnelle) et non pas par l'évolution chronologique de la réflexion. Nous reviendrons sur ce dernier point dans le chapitre 5.

L'étude des *fab constraints* s'inscrit dans le cadre d'un projet d'implémentation d'un système de planification automatisée. Ce système doit être alimenté par différentes informations dont la *processabilité*, et doit être capable de la projeter dans le temps. Ainsi, l'information sur la *processabilité* n'est plus exclusivement utilisée par le MES, et doit être partagée avec le système de planification. A ce niveau, les *fab constraints* sont devenues un vrai point bloquant : une mauvaise évaluation de la *processabilité* par le système de planification conduirait à des rejets lors de l'exécution du planning proposé.

Pour faciliter l'identification des éléments de la *processabilité*, la réflexion de départ portait sur les éléments existants et les outils utilisés pour son évaluation. Cette approche permet à la fois de mieux comprendre l'existant, de préparer les bonnes questions pour l'identification des besoins effectifs des utilisateurs, et de pouvoir soulever des interrogations quant aux évolutions possibles de la *processabilité*. Le fil conducteur pour cette étude de l'existant était la question « Quelles sont les informations dont nous avons besoin pour statuer sur l'avancement du lot ? » (afin d'alimenter les modules de

planification, de projection de compteurs, etc.). Une première analyse a permis de synthétiser les éléments nécessaires à la *processabilité*, comme schématisé dans la Figure 4.9.

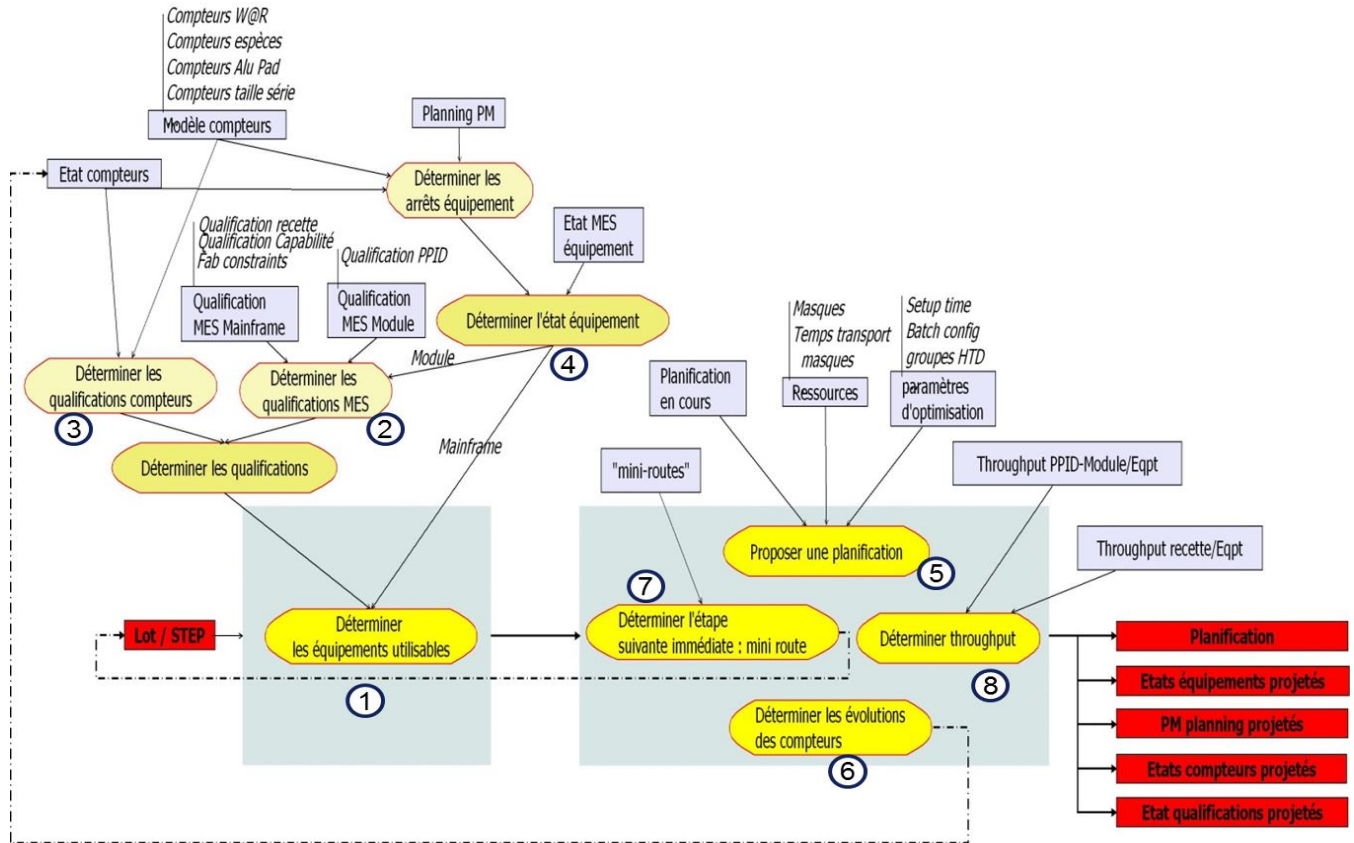


Figure 4.9 : Préparation de l'étude de la processabilité

Pour une étape donnée de fabrication d'un lot, nous déterminons la liste des équipements utilisables (1). Les équipements doivent être qualifiés au regard du MES (que ce soit pour l'équipement ou ses modules)(2), et au regard des compteurs (le dépassement d'un seuil de compteur déqualifie l'équipement)(3). Aussi, il faut prendre en compte les statuts des équipements qui regroupent les états maintenances (en arrêt, en réparation, etc.) et les états du MES (en production, en attente, libre, etc.)(4). Sur le volet projection de la processabilité, il faut prendre en compte la planification proposée (avec l'ensemble des paramètres qui lui sont nécessaires tels que la situation actuelle de la production, les ressources disponibles et leur évolution, les paramètres d'optimisation, etc.)(5), l'évolution des compteurs (6), la prochaine étape du lot en question (7). Quant au calcul du débit, l'intérêt est de proposer une nouvelle planification de la production (l'aptitude à projeter la processabilité induit systématiquement l'aptitude à proposer des planifications de production)(8). L'analyse concernait la processabilité, cependant nous risquons de dériver sur d'autres aspects pour la projection des états équipements, des compteurs, etc. Cela démontre d'une part l'importance de la processabilité pour ces différents systèmes, et aussi d'autre part l'importance de délimiter le périmètre de l'étude dès le départ.

Ce travail préparatoire sur la *processabilité* est primordial pour le groupe de travail : il faut absolument pratiquer une analyse terrain des *fab constraints* (ainsi que le codage SQL) pour comprendre leur fondement fonctionnel et les besoins qu'elles sont supposées couvrir. Comme synthèse de cette analyse, nous avons établi dans le Tableau 4.3 une liste générique de scénarios de *processabilité* avec les acteurs qui leur sont associés.

Tableau 4.3 : Exemples de scénarios de processabilité

Acteur	Scénarios
Ingénieur Process	Dévalider le couple techno / niveau car l'équipement sait faire ce process mais on observe des problèmes d'intégration avec les étapes précédentes ou suivantes
Ingénieur Process	N'autoriser une recette que pour certaines technologies
Ingénieur Process	Interdire le produit car les spécificités de ce dernier font que l'équipement n'est plus en mesure de répondre aux spécifications produit
Ingénieur Process	Interdire les process qui utilisent un consommable particulier
Ingénieur Process / Équipement	Dévalider le couple techno / niveau car l'équipement n'est plus en mesure de répondre au niveau de performance requis

Les scénarios décrits ci-dessus sont génériques permettant ainsi une compréhension commune par les différents ateliers (éviter de nous cantonner dans un langage métier spécifique à un atelier particulier) tout en restant pertinent sur le sens véhiculé. La prochaine étape à la suite de cet exercice est d'identifier les concepts fonctionnels répondant à ces scénarios. L'objectif est de définir des solutions fonctionnelles, sans tenir compte des systèmes existants ou des limitations d'implémentation, qui permettent de répondre directement aux scénarios d'usage. Un scénario ne peut être traité que par une et une seule solution fonctionnelle (évidemment un concept fonctionnel peut couvrir plusieurs scénarios). Dans le cas contraire, il faudra soit affiner la solution pour dégager sa spécificité, soit revoir le scénario défini et mieux exprimer les attentes correspondantes. A titre d'exemple, reprenons dans le Tableau 4.4 un scénario parmi ceux de l'exemple du Tableau 4.3.

Tableau 4.4 : Exemple de scénario avec ses possibles concepts fonctionnels

Acteurs	Scénario	Concepts fonctionnels	
		Gestion par la qualification	Gestion des dérives process
Ingénieur Process	N'autoriser une recette que pour certaines technologies	X	X

Nous arrivons à gérer l'interdiction d'utiliser certaines *recettes* pour certaines *technologies* à la fois par le concept des *qualifications* et par celui des *dérives process*. Bien que le résultat d'interdiction soit le même avec ces deux concepts, leur impact sur la gestion de production est complètement différent : une interdiction par qualification signifie que le retour à la production requiert un processus long et coûteux de « certification », alors qu'une interdiction suite à *dérive process* signifie que cette interdiction n'est que temporaire et qu'une « simple » intervention permettra de retrouver une situation nominale (en cas de limitation de capacité de production, une action sur ce périmètre sera peu coûteuse pour satisfaire une augmentation de la demande de production). D'ailleurs, c'est en partie à cause de cette confusion d'usage que les *fab constraints* limitent la capacité de production (prise de décision difficile pour la suppression d'une *fab constraint* vu ses conséquences : s'agit-il d'une qualification dont la suppression impactera le produit, ou d'une simple *dérive process* dont l'impact sur le produit demeure maitrisable)! Nous proposons dans ce qui suit d'affiner le scénario pour que nous arrivions à distinguer l'usage des différents concepts fonctionnels comme illustré au Tableau 4.5.

Tableau 4.5 : Clarification des concepts fonctionnels en affinant le scénario

Acteurs	Scénario	Commentaire	Concepts fonctionnels	
			Gestion par la qualification	Gestion par dévalidation temporaire
Ingénieur Process	N'autoriser une recette que pour certaines technologies	Hypothèse 1 : Interdiction à long terme (interdiction définitive)	X	
		Hypothèse 2 : Interdiction temporaire pour toutes les technologies avec la recette en question à cause d'une usure précoce de l'équipement (induisant une <i>dérive process</i>)		X

Tenant compte des commentaires précédents sur la différence d'usage entre la gestion par la *qualification* et la gestion par dévalidation temporaire (*dérives process*), nous distinguons le cas de figure d'une interdiction à long terme de celui d'une interdiction temporaire. Cet exercice nécessite de valider avec les opérationnels la raison d'expression de ce besoin. Une prise de recul est nécessaire durant ces interviews afin de ne pas généraliser une constatation rencontrée dans un atelier pour le reste des ateliers, et d'arriver à distinguer ce qui est générique de ce qui est spécifique tout en garantissant l'utilisation d'un langage commun.

L'analyse des autres *fab constraints* et les échanges avec les différentes parties prenantes sur la *processabilité* a permis d'identifier de nouveaux concepts fonctionnels (autres que les « éléments classiques de la *processabilité* » qui sont spécifiques à Crolles300 avec le contexte de mix produits important, et qui peuvent être appliqués dans des contextes similaires) :

- **Les critères de qualité** : ils permettent d'orienter le lot vers le meilleur équipement en fonction de ses performances et des exigences ou de la sensibilité produit / niveau.
- **L'appairage** (équipement / procédé): Il permet d'orienter le lot de façon à repasser sur le même équipement à différentes étapes de sa route, ou de conditionner le choix d'un procédé à une étape donnée en fonction du procédé utilisé à une des étapes précédentes.
- **Les campagnes** : il s'agit ici de sécuriser le traitement des lots en choisissant des procédés compatibles du point de vue enchaînement (on cherche ici à éviter les risques dits de « contamination croisée »).

Dans ce qui suit, nous définissons une ontologie pour chaque concept fonctionnel identifié.

4.4.2 Remise à plat des éléments existants du MES

Bien que l'objectif de départ était de poser les éléments de base pour la *processabilité*, nous avons dû revoir la façon dont est construite la gamme de fabrication et la notion de produit. En effet, au travers de l'analyse des *fab constraints*, plusieurs nouvelles entités métiers étaient identifiées, d'où la nécessité de les mettre en exergue (au lieu de les « camoufler » via le « contournement » de l'usage initial des éléments standards du MES).

- Remise à plat du modèle de la gamme de fabrication

L'étude des *fab constraints* a permis la remise à plat de la gamme de fabrication et l'identification des éléments métiers utilisés. Nous illustrons nos propos par la Figure 4.10.

Une *technologie* regroupe les différentes *routes* (gammes de fabrication) possibles, une *route* ne peut appartenir qu'à une seule *technologie*. De même, pour réaliser un *produit*, une et une seule *route* est utilisée. Cette dernière peut être utilisée pour différents *produits*. Ainsi, une *technologie* peut regrouper plusieurs *produits* et un *produit* n'appartient au plus qu'à une seule *technologie*. La *route* est constituée d'une *séquence d'étapes* regroupées au sein d'*opérations*, elles-mêmes regroupées au sein de *briques* : le triplet (*brique*, *opération*, *étape*) est unique par *route*. Chaque *brique* a un et un seul *niveau* qui est dépendant de l'*atelier* considéré. Pour les besoins de prototypage des nouveaux produits et de R&D à Crolles300, les *technologies* peuvent utiliser différents *niveaux* et vice-versa. Cela offre plus de flexibilité pour la création des *technologies*. De même, chaque *niveau* permet l'usage de différents *procédés*, ces derniers pouvant appartenir à différents *niveaux*. L'usage des *recettes génériques* peut être commun à différentes *séquences d'étapes*, mais ces dernières ne peuvent avoir au plus qu'une seule *recette générique*. Enfin, à chaque *séquence d'étapes* (*brique*) est associé un et un seul *type de conteneur de transport* (« *carrier type* ») ce dernier pouvant être commun à différentes *séquences d'étapes*. La classe association de la *séquence d'étapes* et du *produit* permet de définir l'échantillonnage qu'un lot du *produit* considéré va subir, lorsqu'il passe cette *séquence d'étapes*. Cette classe association permet également d'identifier la *recette* correspondante (recette résolue) : l'interprétation des paramètres

produit pour la *recette générique* permet d'identifier la *recette résolue* (le chargement est dépendant pour chaque *séquence d'étapes* vu qu'il ne lui est associé qu'une et une seule *recette générique*).

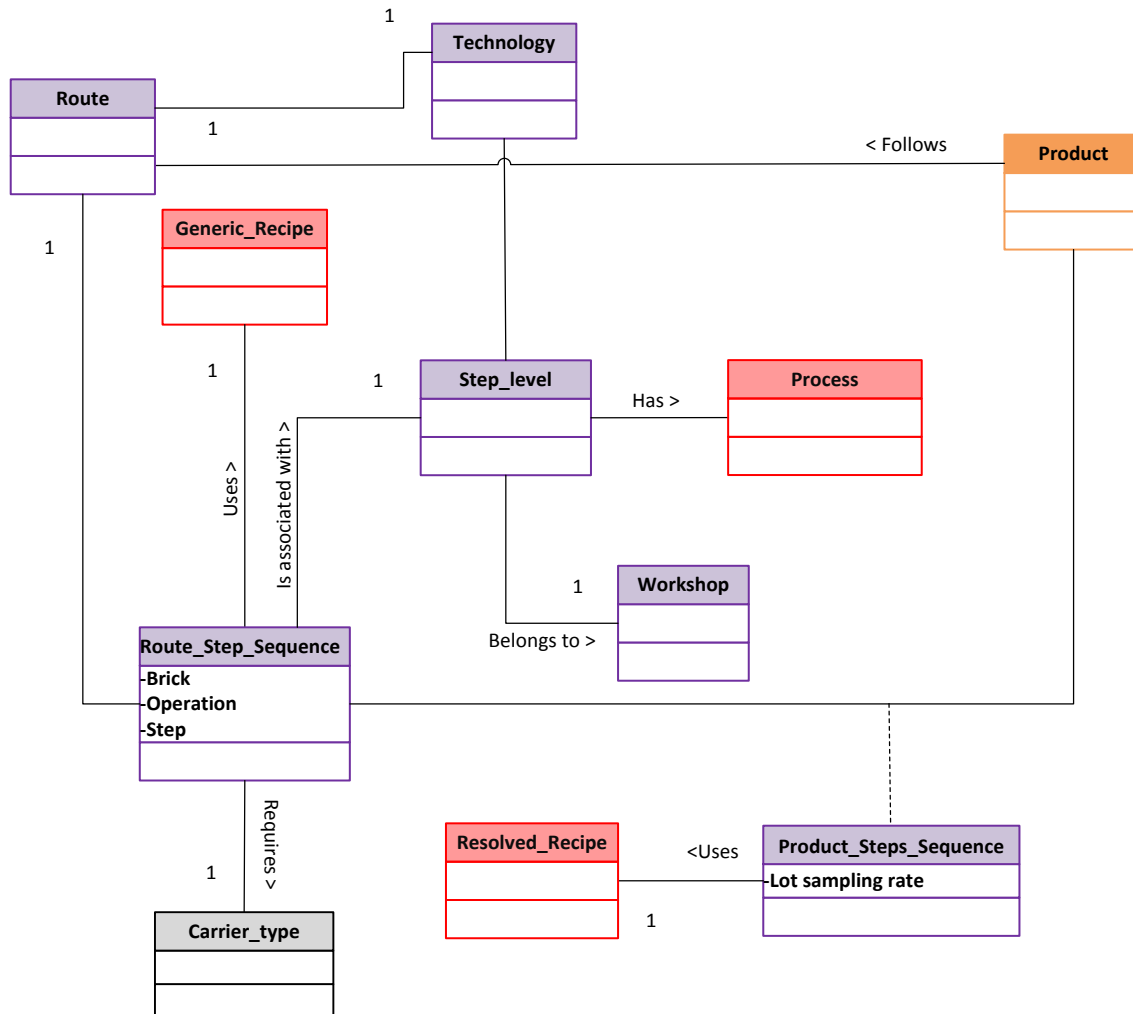


Figure 4.10 : Remise à plat de la route

La remise à plat des éléments de la route a permis de poser les objets métiers qui porteront la traduction du contenu fonctionnel des *fab constraints*. Nous continuons le même exercice pour les entités *produit* et *procédé*.

- Remise à plat du modèle produit

Dans la suite de la préparation de l'étude des *fab constraints*, nous rattachons le produit aux éléments de la route décrite précédemment comme indiqué sur la Figure 4.11.

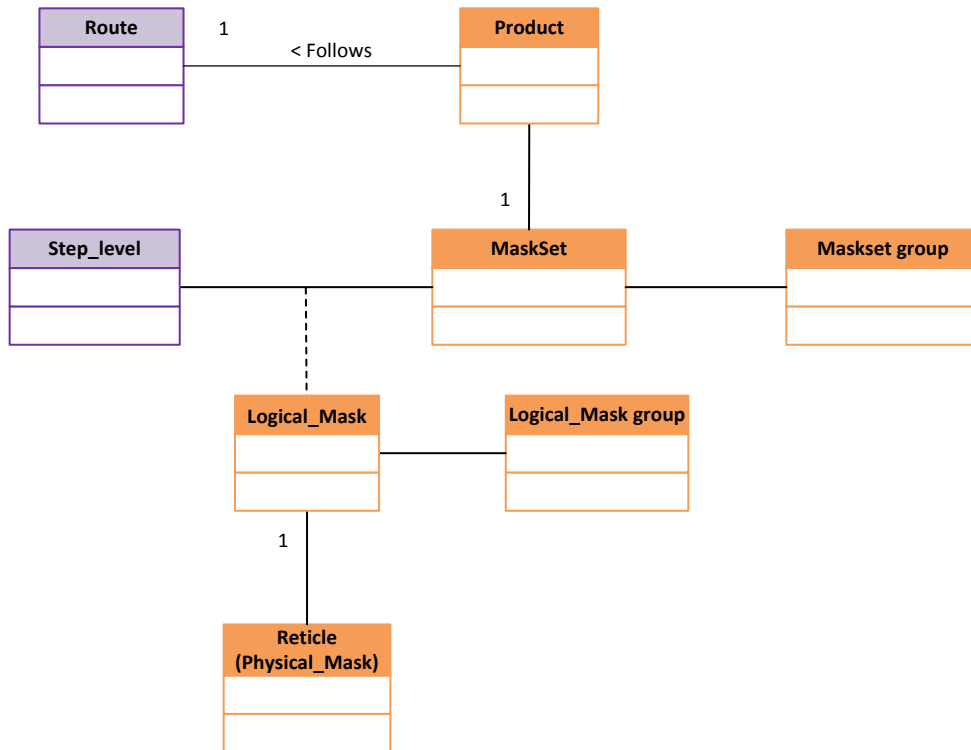


Figure 4.11 : *Modèle des produits*

Comme expliqué précédemment, un *produit* suit une et une seule *route*. Un *produit* est associé à un et un seul *jeu de masque* (*mask set*), alors que ce dernier peut être commun à différents produits. Aussi, le *jeu de masques* peut être utilisé à différents *niveaux*. Or, l'association *niveau route* est binaire (d'après la Figure 4.10). Sachant qu'une *route* regroupe un ensemble de *produits*, nous restons ainsi cohérents sur l'association *produit – jeu de masque*. La référence du masque à utiliser (*logical mask*) est déduite d'après la classe association *niveau – jeu de masque*. Cette référence permet d'identifier le masque *physique / réticule* à utiliser. Il existe plusieurs *réticules*, pour une même *référence de masque*, à utiliser, afin de permettre une production en simultanée des produits fabriqués en grand volume. La création des groupes des *jeux de masques* et *références de masques* était basée sur une constatation terrain pour des associations binaires.

- Remise à plat du modèle des procédés

Après la remise à plat de la *route* et du *produit*, nous terminons cette étape en faisant le lien avec l'équipement par la remise à plat des *procédés*. La Figure 4.12 illustre la nouvelle disposition.

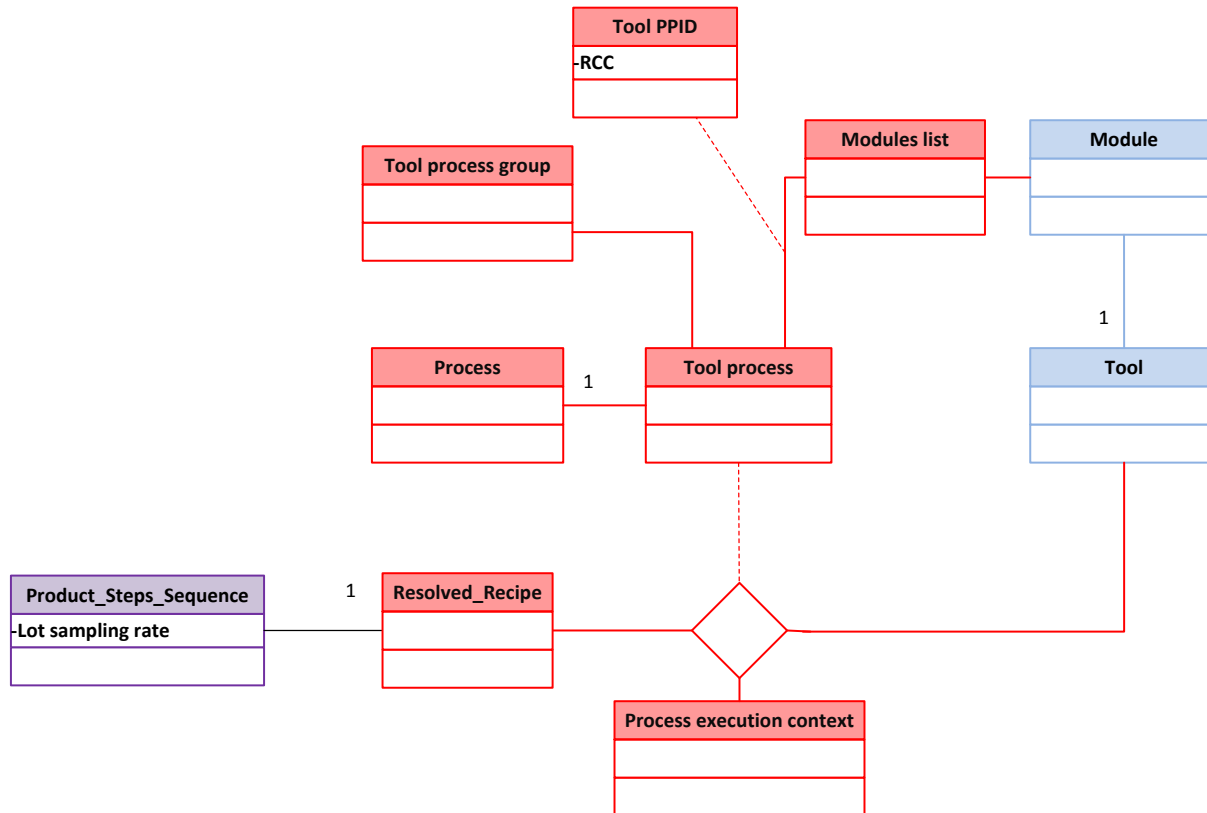


Figure 4.12 : Modèle des procédés

Nous avons vu sur la Figure 4.10 que la résolution de la *recette* dépend à la fois du *produit* et de la *séquence d'étapes*. Il reste à déterminer comment traduire les paramètres de la *recette résolue* sur l'équipement. C'est à ce niveau que le choix du *procédé* est crucial. Le triplet « *contexte d'exécution* (mode standard, utilisation des témoins, etc.), de la *recette résolue* et de l'équipement permet d'identifier le *procédé compatible* (*tool process*). Celui-ci émane d'une « famille parente » qui est la classe *procédé* (*process*). Notons que les *procédés compatibles* (*tool process*) sont groupés au travers d'une association binaire. Nous regrettons / déplorons la non unicité de ce groupage (1 à n), cependant l'usage terrain impose cette configuration. Dans le cas où le *procédé compatible* (*tool process*) nécessite un passage sur les modules de l'équipement (c'est plutôt que l'équipement en question est un équipement à modules), la classe association entre la *liste des modules* et le *procédé compatible* (*tool process*) permet d'identifier la séquence de passage du lot sur les modules (avec les différentes combinaisons logiques tolérées) en fonction de la RCC (*Raw Chamber Condition*). Notons qu'une *liste de modules* peut regrouper plusieurs *modules* et qu'un module peut appartenir à plusieurs *listes*. Enfin, un module ne peut appartenir qu'à un seul équipement.

L'identification des objets métiers de base est le résultat de l'étude des *fab constraints*. Maintenant nous poursuivons leur analyse en abordant la *processabilité*, et en se référant aux nouveaux modèles définis dans la section 4.4.2. Nous proposons une classification d'usage des *fab constraints* pour la *processabilité* dans les points suivants.

4.4.3 Modélisation de la qualification

Bien que la qualification soit un des éléments classiques de la *processabilité*, elle n'a été prise en compte initialement dans le MES qu'au travers des recettes. Or, la pratique terrain a montré que cela n'était pas suffisamment discriminant. A titre d'exemple, la *fab constraint* du Tableau 4.6 tendait à agir sur la qualification.

Tableau 4.6 : Exemple de *fab constraints* traitant de la qualification

Equipement	Description	Expression
SGAMA04	Niveau PLDDGO2 sur techno *120* non autorisé	FABLOTEXT.RECIPENAME LIKE 'BDRYS-HDTR-A0' AND EXISTS (SELECT PRODUCTNAME FROM FWPRODUCTVERSION WHERE FWPRODUCTVERSION.PRODUCTFAMILY = 'CMOS120' AND FWLOT.PRODUCTNAME = FWPRODUCTVERSION.PRODUCTNAME) AND EXISTS (SELECT IMPLEMENTID FROM FWPRPINFO, FWLOT_N2M WHERE FWLOT.SYSID = FWLOT_N2M.FROMID AND FWPRPINFO.SYSID = FWLOT_N2M.TOID AND IMPLEMENTID LIKE 'B_PLDDGO2%')

Bien que le descriptif de la *fab constraint* visait à interdire le niveau « PLDDGO2 » pour les nœuds technologiques en « 120nm », le besoin effectif de cette interdiction visait à annuler une qualification. Notons d'ailleurs que le codage de la contrainte interdisait la famille technologique des produit en « CMOS120 » et non pas le nœud technologique en « 120 » comme transcrit dans la description. Cet exemple rejoint celui de la *fab constraint* du Tableau 4.1 pour cette confusion fonctionnelle.

Même si les *recettes* sont par défaut interdites et que seul le processus de *qualification* permet de les utiliser en production, il n'en demeure pas moins que l'absence d'un modèle précisant le périmètre de *qualification* limite les apports de cette action. Aussi, vu que les *recettes* peuvent être communes à différentes *technologies*, qualifier ces recettes sans tenir compte de leur contexte d'utilisation n'apportera qu'une réponse partielle. Pour cela, nous proposons d'apporter une nouvelle approche (par rapport à l'existant) concernant la *qualification*. D'abord, nous définissons le « Qualifion » comme l'entité élémentaire pour la qualification. Il s'agit de contextualiser la *recette* à qualifier tenant compte du *niveau* utilisé et de la *technologie*. A ce niveau, il s'agit de qualifier la *recette générique* : il n'est pas nécessaire de qualifier la *recette résolue* qui intègre les paramètres produits. En effet, pour ce dernier, il suffit qu'il suive une route où ses recettes sont qualifiées. Cela permet d'apporter une industrialisation plus flexible des produits (la pratique est de ré-utiliser des sous-ensembles des routes pour les nouveaux produits, donc un gain de temps important à ne pas avoir à requalifier inutilement des

recettes génériques). Nous schématisons dans la Figure 4.13 la construction de cet embryon de qualification.

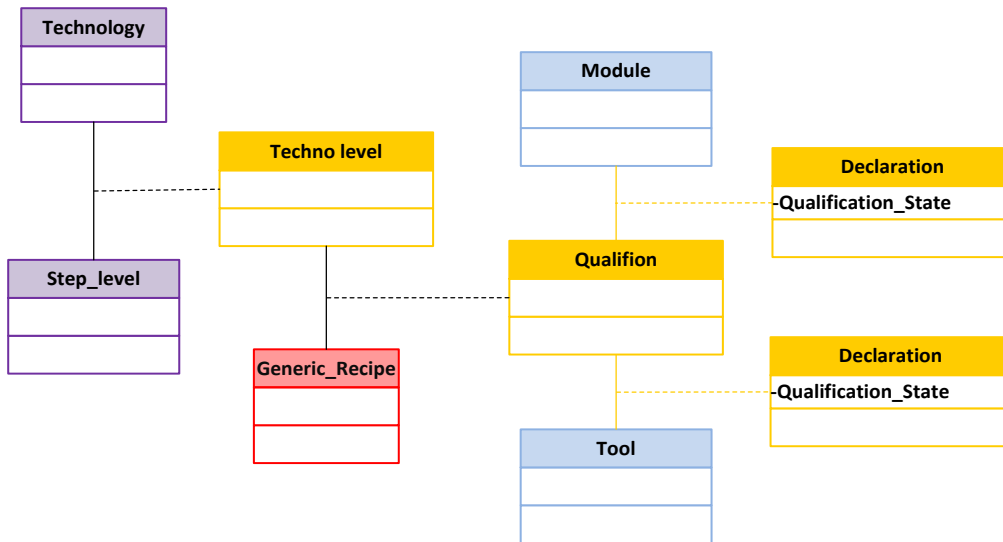


Figure 4.13 : Nouveau modèle de la qualification

La classe association entre les objets métiers *technologie* et *niveau* permet de définir le *niveau de la technologie*. Par une classe association de ce dernier avec la *recette générique*, nous obtenons le « *qualifion* » (précisant ainsi le contexte « technologie, niveau, recette »). Pour donner sens à l'action de qualification, nous l'associons aux équipements et ses modules, où leurs classes associations permettent de statuer sur l'état de qualification. Cette configuration nous permet d'avoir une vision globale sur la capacité de l'unité de fabrication en termes d'équipements qualifiés, non-qualifiés, et potentiellement qualifiables.

4.4.4 Modélisation des restrictions des procédés

Dans la même logique que la restriction pour les dérives process dans la section 4.2.4, l'analyse des *fab constraints* a permis d'identifier de nouveaux éléments d'interdiction, nous parlerons de *leviers*. Il s'agit « d'actionneurs » permettant de cibler directement des éléments de *processabilité* du MES (capabilité, recette, identifiant du procédé). L'introduction de nouveaux produits sur les lignes de fabrication et les évolutions technologiques ont poussé à étendre le champ des *leviers* au-delà des triplets initiaux du MES, et à agir sur leur association. L'usage des éléments existants du MES pour définir de nouveaux objets métiers a conduit à une mauvaise interprétation de ce que les opérationnels visaient à impacter comme périmètre. Les défis sont multiples. D'abord, il faut comprendre le besoin effectif de « restriction » ou « d'interdiction ». Par exemple, pour la *fab constraint* du Tableau 4.2, l'interdiction portait sur l'usage des lots ayant des masques de la référence « 1A24A ». Le besoin effectif visait plutôt une famille de masques à partir de laquelle l'utilisation des équipements L248C04 et L248C05 n'était plus compatible (évolution du procédé de fabrication des masques chez le fournisseur). Ensuite, il faut créer de nouveaux objets métiers répondant aux besoins d'interdiction (au lieu de « contourner » l'usage des éléments classiques du MES). Par exemple, la *fab constraint* du tableau 4.1 décode la *recette* pour

parvenir à identifier les *niveaux* « IN » et « HM » à interdire. Pour cela, à chaque fois où cela est justifié, nous avons défini de nouveaux éléments métiers, d'où la remise à plat des modèles de la *route*, du *produit*, et des *procédés* en section 4.4.2. Un défi supplémentaire dans cette partie consiste à gérer la complexité des combinaisons des différents leviers avec leurs différentes valeurs, le tableau 4.7 illustre un cas rencontré en *fab constraints*. L'exemple du Tableau 4.7 se rapporte à un besoin d'interdiction couvrant soit l'association des niveaux et des *technologies* (avec leurs différentes valeurs), soit la *recette* « N-CD-193 ».

Tableau 4.7 : Exemple de *fab constraints* pour la complexité des combinaisons de leviers

Equipement	Description	Expression
QS93004	Layer PHOTO / ETCH GATE - ETCH OFFSET - ETCH SPAC TechnoC120 C12A C110 C090 I175 I140 I175HP F90F - CD Monitor 193 interdits	((FABLOTEXT.RECIPENAME LIKE '%GATE-ET%' OR FABLOTEXT.RECIPENAME LIKE '%SPAC-ET%' OR FABLOTEXT.RECIPENAME LIKE '%GATE-PH%' OR FABLOTEXT.RECIPENAME LIKE '%OFFS-ET%') AND EXISTS (select PRODUCTNAME from FWPRODUCTVERSION where FWPRODUCTVERSION.PRODUCTFAMILY IN ('CMOS120','CMOS12A','CMOS090','IMG175','IMG14 0','I175HP','FLASH90F') AND FWLOT.PRODUCTNAME = FWPRODUCTVERSION.PRODUCTNAME)) OR (FABLOTEXT.RECIPENAME LIKE '%N-CD-193%')

Un dernier défi dans cette partie, et qui reste vrai pour l'ensemble du travail de modélisation, est de parvenir à remettre à plat les restrictions des procédés existantes en tenant compte des nombreux cas spécifiques par atelier, et à cerner des pratiques métiers différentes pour les mêmes objets tout en identifiant des pratiques communes mais utilisant des objets métiers différents !

Tenant compte de l'ensemble de ces constatations, nous définissons une modélisation des restrictions de procédés en respectant les règles suivantes :

- i. Définir une logique basée exclusivement sur l'interdiction. Pour interdire des sous-parties des éléments qualifiés sur un équipement (qui sont donc en état d'autorisation), nous créons les leviers adéquats pour interdire la partie visée pour l'interdiction. Les *fab constraints* telles que celle du Tableau 4.2 sont à re-modéliser pour respecter cette règle (interdiction de toutes les technologies sauf d'une partie).
- ii. Simplifier la description des restrictions en faisant appels aux opérateurs logiques. Les *leviers* utilisés sont liés uniquement par l'opérateur « ET » : c'est la construction d'une clause de *sous-restriction*. Une liste de valeurs est associée à chaque *levier* : elles sont liées par l'opérateur « OU ». Pour construire une *restriction*, les différentes *sous restrictions* sont liées à l'aide de l'opérateur « OU », tel que formulé dans l'équation (1).

$$\text{Restriction} \left\{ \begin{array}{l} \text{Sub restriction}_1 \left\{ \begin{array}{c} \text{Lever}_{11} \\ \left(\begin{array}{c} \text{Value}_1 \\ \text{OR} \\ \vdots \\ \text{OR} \\ \text{Value}_i \end{array} \right) \end{array} \right. \text{AND} \left(\begin{array}{c} \text{Lever}_{12} \\ \left(\begin{array}{c} \text{Value}_1 \\ \text{OR} \\ \vdots \\ \text{OR} \\ \text{Value}_i \end{array} \right) \end{array} \right) \text{AND} \dots \text{AND} \left(\begin{array}{c} \text{Lever}_{1n} \\ \left(\begin{array}{c} \text{Value}_1 \\ \text{OR} \\ \vdots \\ \text{OR} \\ \text{Value}_i \end{array} \right) \end{array} \right) \\ \text{OR} \\ \text{Sub restriction}_2 \left\{ \begin{array}{c} \text{Lever}_{21} \\ \left(\begin{array}{c} \text{Value}_1 \\ \text{OR} \\ \vdots \\ \text{OR} \\ \text{Value}_i \end{array} \right) \end{array} \right. \text{AND} \left(\begin{array}{c} \text{Lever}_{22} \\ \left(\begin{array}{c} \text{Value}_1 \\ \text{or} \\ \vdots \\ \text{OR} \\ \text{Value}_i \end{array} \right) \end{array} \right) \text{AND} \dots \text{AND} \left(\begin{array}{c} \text{Lever}_{2n} \\ \left(\begin{array}{c} \text{Value}_1 \\ \text{OR} \\ \vdots \\ \text{OR} \\ \text{Value}_i \end{array} \right) \end{array} \right) \\ \text{OR} \\ \vdots \\ \text{OR} \\ \text{Sub restriction}_m \left\{ \begin{array}{c} \text{Lever}_{m1} \\ \left(\begin{array}{c} \text{Value}_1 \\ \text{OR} \\ \vdots \\ \text{OR} \\ \text{Value}_i \end{array} \right) \end{array} \right. \text{AND} \left(\begin{array}{c} \text{Lever}_{m2} \\ \left(\begin{array}{c} \text{Value}_1 \\ \text{OR} \\ \vdots \\ \text{OR} \\ \text{Value}_i \end{array} \right) \end{array} \right) \text{AND} \dots \text{AND} \left(\begin{array}{c} \text{Lever}_{mn} \\ \left(\begin{array}{c} \text{Value}_1 \\ \text{OR} \\ \vdots \\ \text{OR} \\ \text{Value}_i \end{array} \right) \end{array} \right) \end{array} \right. \quad (1)$$

Cette configuration apporte une flexibilité pour combiner les leviers et les gérer, et assure une lecture fonctionnelle fidèle aux besoins des utilisateurs.

- iii. Bannir l'usage des caractères génériques (« *wild cards* » afin de garantir la maîtrise du périmètre d'interdiction. Quant à la problématique d'alimentation des données (un volume de l'ordre de centaines de milliers pour les recettes par exemple), un moteur de collecte peut automatiquement identifier les données à inclure dans le périmètre. En lien avec la règle (i), les formulations « interdire le levier $L1_{i(h..n)}$ sauf pour le levier $L2_{j(k..m)}$ » consiste à utiliser une liste rassemblant les valeurs du levier $L2_{j(1..k-1)}$, et de le combiner avec le levier $L1_{i(h..n)}$ (établissement de la combinaison selon la règle (ii)). Ainsi, l'exemple de la *fab constraint* du Tableau 4.2 pour interdire toutes les technologies sauf la *I140* revient à créer une liste de valeurs de technologies les couvrant toutes excepté celle de la *I140*.
- iv. Bannir la duplication des restrictions. Le même exemple de la *fab constraint* du Tableau 4.2 illustre cette duplication où le besoin d'interdiction était répété pour les équipements L248C04 et L248C05. Ce cas de figure n'est pas unique et soulève des difficultés pour la mise à jour des interdictions qui doivent être vérifiées une par une sur tous les équipements concernés. Ainsi, nous préconisons de dissocier les interdictions des équipements, et de les attacher avec un mécanisme d'activation.

Tenant compte de l'analyse des *fab constraints* et des règles de modélisation, nous définissons le nouveau modèle pour la gestion des *restrictions des procédés* dans la Figure 4.14.

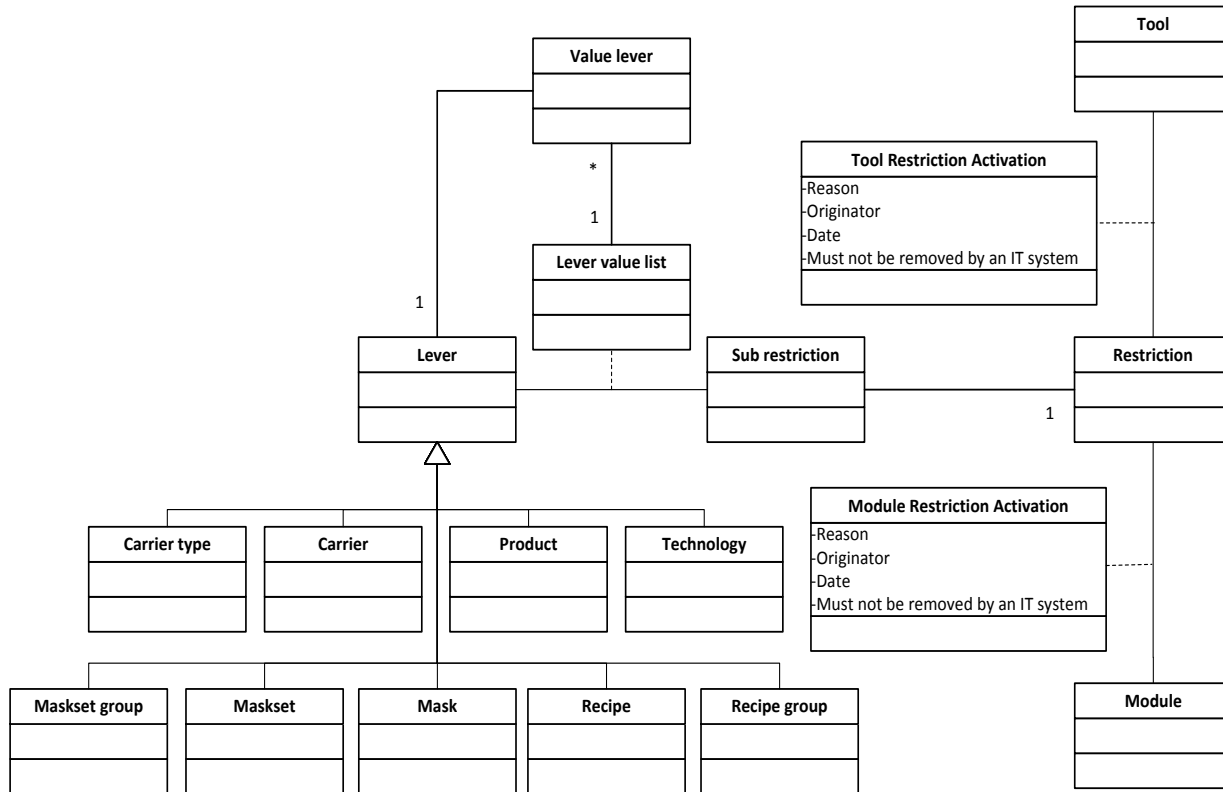


Figure 4.14 : Nouveau modèle de la gestion des restrictions

Une *restriction* peut être appliquée sur un *équipement* ou l'une de ses sous-parties (ses *modules*) : l'application est réalisée à l'aide d'un *mécanisme d'activation*. Ce mécanisme est intéressant sur plusieurs aspects. D'abord, il permet de tracer la *restriction* en termes (i) de la raison de sa création, (ii) de son origine (déclenchée par une action humaine suite à la détection d'une anomalie, ou automatiquement par les systèmes de contrôle de process SPC/FDC ou autre), et (iii) de l'heure de création de l'activation de la restriction. Aussi, une *restriction* peut être activée à cause de plusieurs raisons. A cet effet, la *restriction* ne pourra être levée que si et seulement si toutes les raisons de son déclenchement ont été levées. Ainsi, la *classe association d'activations* comporte un attribut pour autoriser ou pas la levée automatique d'une restriction (les raisons critiques ou nouvelles peuvent nécessiter une validation humaine pour éviter tout risque sur la qualité des lots). Un autre intérêt du mécanisme d'activation est qu'il permet de gérer « facilement » la mise en place des restrictions et leur levée : la gestion des *dérives process* et la dégradation des performances des équipements font partie du quotidien de la salle blanche, avec une fréquence d'intervention importante (d'où encore l'intérêt de garder une traçabilité des actions d'activation des restrictions). Chaque *restriction* rassemble une ou plusieurs *sous-restrictions*, leur association a une signification logique en « OU ». L'association des *sous-restrictions* avec les *leviers* permet d'identifier la *liste des valeurs* à utiliser. Cette association a une signification logique en « ET ». La classe *liste des valeurs à utiliser* cherche ses valeurs dans la classe *valeurs de levier* (toutes les valeurs d'une même liste sont interprétées comme ayant un lien logique en « OU »), qui est aussi rattaché à classe *levier*. La classe *levier* est une généralisation des différents leviers

qui peuvent être utilisés : cette configuration permet d'apporter une flexibilité pour rajouter de nouveaux leviers, et d'avoir une lecture directe des besoins d'interdiction.

4.4.5 Modélisation des critères de qualité

Pour réaliser un produit dans les meilleures conditions, le lot concerné doit être orienté vers l'équipement ayant les meilleures performances pour l'opération visée. La limitation des *fab constraints* pour gérer cette situation est qu'elles figent le choix des « meilleurs équipements ». Ce choix risque d'être contreproductif vu que chaque équipement suit son propre cycle de vie et que ses performances évoluent au cours du temps : un équipement arrivé à échéance d'une maintenance préventive ne peut pas avoir le même comportement qu'un équipement qui sort de maintenance. De même, nous ne pouvons pas comparer l'état d'un équipement en phase de maturité à un autre en phase d'usure avancée de ses composants. La *fab constraint* dans le Tableau 4.8 illustre un cas où le choix de l'équipement est figé.

Tableau 4.8 : Exemple de *fab constraints* traitant des critères de qualité

Equipement	Description	Expression
WOASI01	Lot à passer sur WFC3001 ou WSU3002 - Recette B_RCA25RSSR_MON interdite en C090 sur WOASI si WFC3001 ou WSU3002 Up	FABLOTEXT.RECIPENAME LIKE 'B_RCA25RSSR_MON' AND EXISTS (SELECT PRODUCTNAME FROM FWPRODUCTVERSION WHERE FWPRODUCTVERSION.PRODUCTFAMILY = 'CMOS090' AND FWLOT.PRODUCTNAME = FWPRODUCTVERSION.PRODUCTNAME) AND exists (select 1 from FWEQPCURRENTSTATE where (FWEQPCURRENTSTATE.EQUIPMENTNAME='WFC3001' AND FWEQPCURRENTSTATE.STATE IN ('IDLE','IDLE-LIMITED','IDLE-WAIVE','CHILD-TOOL-HOLD','PARENT-UNAVAILABLE','HOLD','HOLDSPC','PROD-LIMITED','PROD-WAIVE','PROD','PROD-INHIBIT','ENGINEERING','CHILD-TOOL-ENGR')))

La contrainte interdit le passage du lot sur l'équipement *WOASI01* tant que les équipements *WFC3001* ou *WSU3002* sont opérationnels. Or, cet état ne garantit pas systématiquement que ces deux équipements ont toujours le meilleur rendement. Aussi, nous pouvons considérer le cas où ces équipements sont opérationnels mais sollicités pour d'autres lots : il serait pénalisant pour la production de faire attendre ce lot alors que d'autres équipements peuvent traiter le lot dans les mêmes conditions, voire mieux.

Pour mieux gérer l'orientation des lots en fonction de la performance des équipements, nous proposons d'introduire la notion de *critère de qualité*. Ce critère à respecter peut être une mesure (défectivité, largeur de la grille, etc.) ou tout autre type d'indicateur calculé à partir des systèmes de pilotage de la production (un compteur d'heure de fonctionnement, temps passé depuis la dernière intervention de maintenance, nombre de lots passé, etc.). Les critères de qualité se caractérisent par la

notion dynamique de leur évolution dans le temps, avec une échelle de l'ordre de l'heure. Le modèle des critères de qualité est représenté par Figure 4.15.

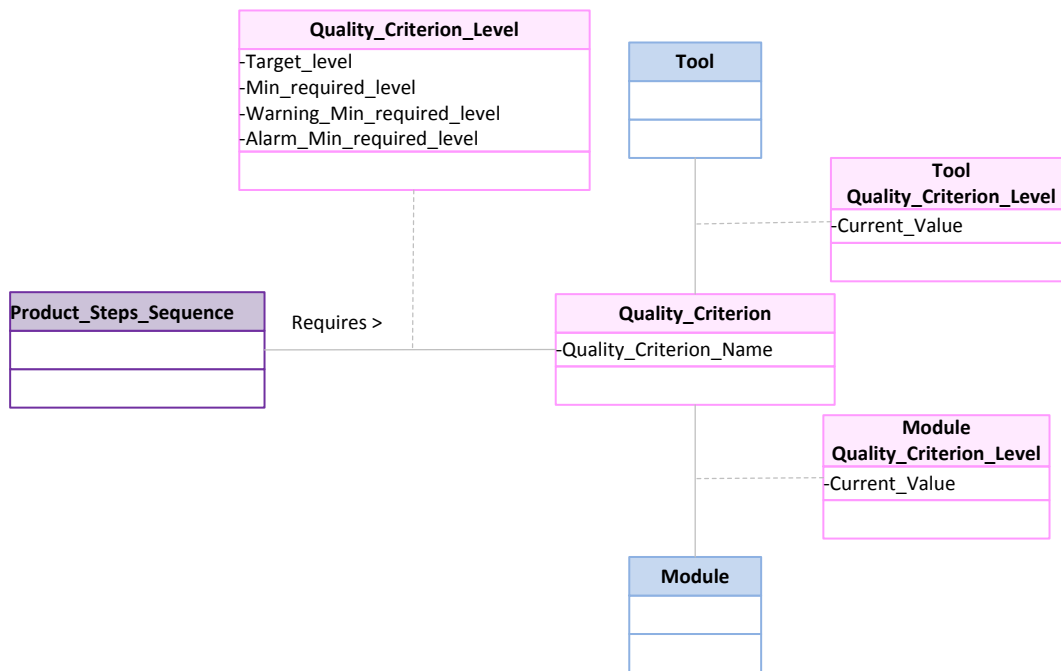


Figure 4.15 : Modèle des critères de qualité

Les *critères qualités* sont associés aux *étapes de fabrication du produit* à chaque fois où cela est critique. Aussi, le même *critère de qualité* est associé à l'*équipement* (et ses modules), où la *valeur courante du critère* en question est définie par couple (équipement/module ; critère de qualité) : sa valeur est mise à jour dynamiquement grâce à l'automatisation. Les *critères de qualité* peuvent être communs à plusieurs *étapes*, et chaque *étape* peut disposer d'un ensemble de critères. Les valeurs à respecter de ces critères sont définies pour chaque couple (critère, étape), d'où la classe association *niveau du critère de qualité* : elle comporte la valeur cible à atteindre. Si aucun équipement ne satisfait cette valeur, nous définissons une valeur minimale moins contraignante permettant ainsi de poursuivre la production (dans des conditions nominales et où le risque sur le lot reste acceptable / maîtrisable). Pour les *étapes exigeantes*, la *valeur minimale* associée au *critère qualité* sera égale à sa *valeur cible*. Pour gérer les cas exceptionnels (risque de perdre le lot faute d'une longue attente d'équipement satisfaisant la valeur cible et/ou minimale du critère de qualité), nous prévoyons de relâcher la contrainte sur la *valeur cible et/ou minimale du critère de qualité* en définissant un *seuil d'alerte* et un *seuil d'alarme*.

La modélisation proposée se caractérise par son caractère générique. En effet, les critères de qualité ne sont plus cantonnés par leur format (qualitatif, quantitatif) ou type (compteur, largeur de grille, etc.), où il aurait fallu avoir une implémentation spécifique pour chaque indicateur. Avec le modèle de la Figure 4.15, l'orientation des lots se fera rien qu'en définissant les critères de qualité et en renseignant leurs valeurs.

La définition d'un modèle pour les critères de qualité a permis d'affiner les éléments de la *processabilité* et de nuancer leur usage. L'interdiction de réaliser un lot sur l'équipement E_2 tant que l'équipement E_1 est disponible est traduite maintenant clairement par une notion de préférence : il est toujours pertinent d'utiliser l'équipement E_2 au risque de perdre partiellement un lot plutôt que de le perdre complètement. Notons que la difficulté pour optimiser l'utilisation des *critères de qualité* réside dans la définition et le choix des critères qui ont un impact sur la qualité du produit.

La modélisation proposée pour la gestion des *critères de qualité* offre une flexibilité pour intégrer tout nouvel élément. Aussi, elle améliore l'évaluation de la *processabilité* en posant clairement la notion de *préférence* (qui peut être stricte ou souple en fonction de la valeur des critères de qualité).

4.4.6 Modélisation de l'appairage

Avec la réduction de la taille des transistors, suivant la loi de Moore, les spécifications de production atteignent la limite de la physique. Le défi de maîtriser la variabilité prend tout son sens, surtout pour la gestion des flux réentrants par atelier. Dans ce contexte, la variabilité inter-équipement doit désormais être prise en compte. La *fab constraint* du Tableau 4.9 illustre cette situation.

Tableau 4.9 : Exemple de fab constraints traitant de l'appairage

Equipement	Description	Expression
EL23S04	Lot mono-chambre - A graver en ETCH_Si_GATE dans meme chambre que pour la gravure hardmask GATE (BHMGA)	FWWIPSTEP.STEPNAME LIKE 'ETCH_SI_GATE-%' AND FWWIPSTEP.PROCESSOPERATIONID LIKE 'O_ETCH_GATE_POLY-%' AND EXISTS (SELECT 1 FROM C2_PROCESSPLANCONF, FWPROCESSPLAN where FWLOT.PLANNAME=FWPROCESSPLAN.NAME AND FWPROCESSPLAN.SYSID=C2_PROCESSPLANCONF.PARENT AND C2_PROCESSPLANCONF.TECHNO_NUM IN ('040', '045')) AND NOT EXISTS (select 1 from fabparameter where objectid=fwlot.appid AND name LIKE '\$MONO_ETCH_HM_POLY' AND substr(value,1,7) = 'EL23S04')

La *fab constraint* du Tableau 4.9 exige que si le lot a été réalisé à l'aide de l'équipement *EL23S04* pour le *niveau ETCH_HM_POLY*, il doit repasser sur le même équipement (et sur le même module) lorsque le lot revient à l'atelier de Gravure pour le *niveau ETCH_SI_GATE* (flux réentrant). Idéalement, ce cas de figure devrait être géré par le modèle des *critères de qualité*. Il aurait fallu, pour les niveaux concernés, mentionner les indicateurs de performance à respecter, et identifier les équipements satisfaisant les seuils définis. Cependant, malgré le nombre impressionnant de paramètres suivis en temps réel par les équipements, certains ne peuvent pas être alignés entre équipements différents (ce qui nécessiterait la calibration régulière de centaine de capteurs par équipement). Le *critère de qualité* à respecter dans ce cas n'est donc pas mesurable et on doit donc faire appel à l'appairage. Si nous disposions de toutes les données expliquant la raison de la variabilité entre les équipements de cet atelier, le modèle des critères de qualité aurait pu être utilisé (nous pouvons alors considérer l'appairage

comme une extension du modèle des *critères de qualité*). Pour remédier à ce manque d'information, nous définissons un modèle propre aux contraintes d'appairage.

Nous proposons également de prendre en compte les appairages des procédés à des ateliers différents : le choix d'un procédé dans l'atelier *A* conditionnera le choix du procédé dans l'atelier *B*. En effet, les consignes des transformations physiques à réaliser, par le choix des procédés à utiliser au niveau des équipements, sont corrélés. Par exemple, le niveau de dépôt, avec un procédé *P1* à l'atelier Métal, conditionnera l'action de planarisation avec un procédé *P2* à l'atelier de Polissage. Bien que la régulation intègre le modèle comportemental de l'équipement (en amont et en aval du procédé réalisé) pour ajuster les consignes en fonction des écarts constatés (au moyen de mesures), la maîtrise de certaines étapes critiques des technologies avancées nécessite un contrôle très précis de paramètres tels que le *temps de process* et la *vitesse de polissage*. Comme l'étalonnage permanent des capteurs permettant d'évaluer ces paramètres n'est pas faisable, on préfère recourir à l'appairage process. Notons que l'appairage, que ce soit en équipement ou en process, ne couvre qu'un faible périmètre de la production puisqu'il se limite aux étapes les plus critiques des technologies avancées. Il est cependant intéressant d'anticiper ce besoin grandissant avec le développement de nouvelles technologies plus avancées : anticiper le futur !

Nous définissons un modèle des appairages dans la Figure 4.16.

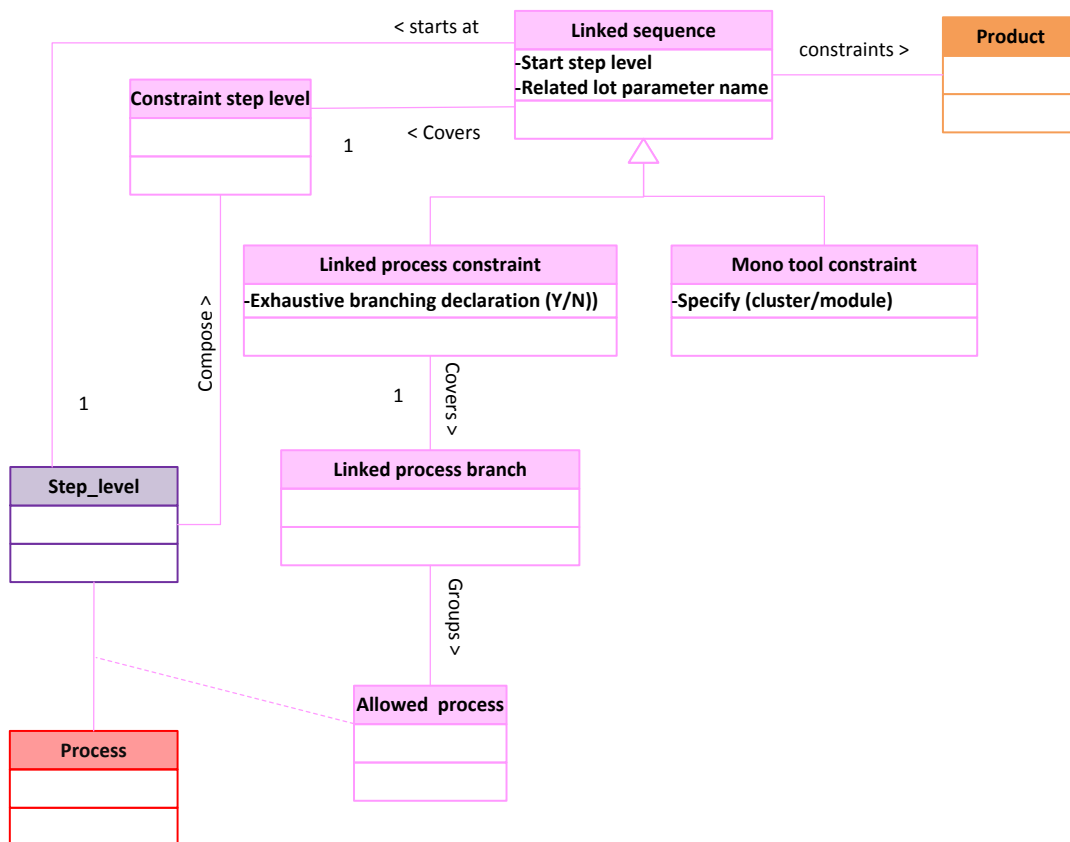


Figure 4.16 : Modèle des appairages

Nous définissons la *séquence liée* comme étant une généralisation de l'*appairage équipement* et de l'*appairage procédé*. C'est le produit qui est contraint par une ou plusieurs *séquences liées* (que ce soit par différents appairages d'équipement, ou par différents appairages de procédés). De même, ces dernières peuvent être communes à différents *produits*. La logique de fonctionnement demeure la même pour ces deux types d'appairage. Par le passage du lot (relatif au produit contraint), un et un seul *niveau* peut amorcer une ou plusieurs *séquences liées*. La *séquence liée* enregistre le ticket de passage du *lot contraint* au *niveau déclencheur* de la *séquence liée* (ce ticket fait le lien entre le *lot*, le *produit*, et la *séquence liée*). Le *périmètre des niveaux contraints* est défini par les *niveaux* qui lui sont associés, le même *niveau* peut appartenir à différents *périmètres de niveaux contraints*. Chaque *séquence liée* impacte un et un seul *périmètre de niveaux contraints*, même si ce *périmètre* peut être partagé entre plusieurs *séquences liées*. A chaque fois que le lot passe sur un *niveau* faisant partie du *périmètre de niveaux contraints* (nous rappelons que ce périmètre est unique par *séquence liée*), il suivra alors les spécificités de fonctionnement de l'appairage équipement / procédé décrit comme suit :

- Appairage équipement : l'équipement / module, vu par le lot au *niveau déclencheur*, sera réutilisé pour tous les futurs *niveaux* faisant partie du *périmètre de niveaux contraints*.
- Appairage procédé : le lot contraint en appairage procédé se caractérise par la *séquence de branches* à suivre (une notion de branche dans la route pour cibler une partie de ses sous-ensembles). La *séquence de branche* définit le *procédé* utilisé lors du *niveau déclencheur* de l'*appairage procédé*. Les futurs *procédés* à utiliser sont définis par le couple (*niveau, procédé*) au travers de la classe association *procédé autorisé*.

4.4.7 Modélisation des campagnes

L'étude terrain pour cerner tous les éléments de la *processabilité* a permis de remonter un nouveau besoin : les campagnes. Elles sont définies comme des ensembles de procédés compatibles, pour lesquels leur enchainement sur les équipements ou modules concernés n'entraîne pas de risque de perte de rendement pour les produits (par contamination croisée par exemple). Le seul objectif visé par les campagnes est la sécurisation de la production. En effet, le changement de campagne nécessite une intervention maintenance (nettoyage, décontamination) sans laquelle le risque de perdre le lot est assuré. Les campagnes ne doivent pas être perçues comme un moyen d'optimisation de la production (en cherchant à réduire le temps de configuration / réglage nécessaire aux équipements). En effet, c'est au module de planification de prendre la décision de changer les séries de procédé (tenant compte du temps de configurations), décision qui ne pourra pas entraver une campagne en cours. Notons que les *fab constraints* ne prenaient pas en charge la gestion des campagnes en dépit de la flexibilité de leur implémentation.

Nous proposons un modèle pour la gestion des campagnes comme schématisé sur la Figure 4.17.

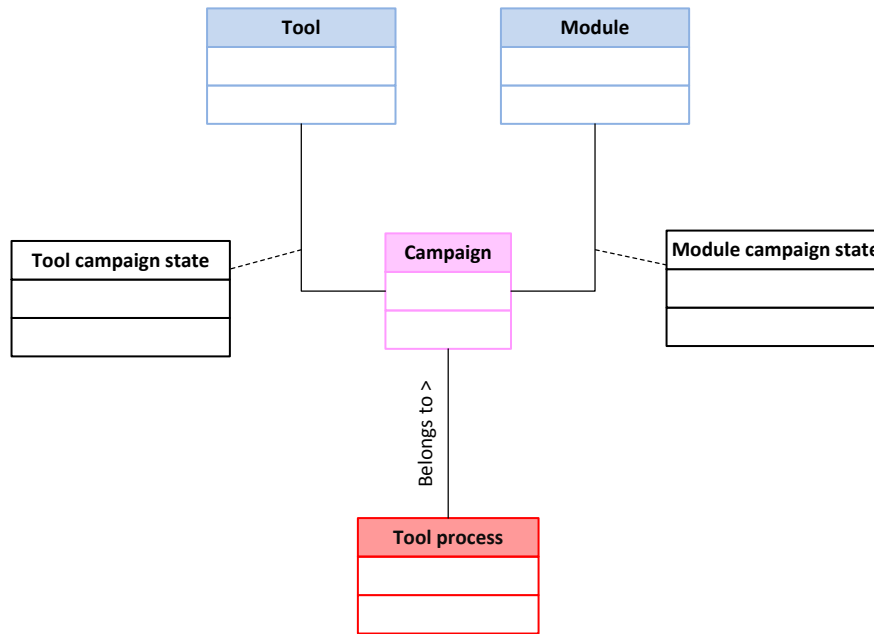


Figure 4.17 : Modèle des campagnes

Une *campagne* se compose des *procédés compatibles* (*tool process*). Un *procédé compatible* peut appartenir à plusieurs *campagnes*. Les couples (équipement, campagne) et (module, campagne) permettent de statuer sur l'état des campagnes en cours. Cette information est primordiale pour l'évaluation de la *processabilité*.

4.5 Apports de la méthodologie

La démarche de modélisation a permis de retrouver le sens initial de chaque type de *fab constraints* et de prendre en compte les besoins fonctionnels réels. En utilisant les diagrammes de classes UML, nous avons défini des modèles couvrant toutes les règles de *processabilité*, en respectant l'exigence forte d'adaptation au changement. Aussi, cette étude a permis de mettre en avant le contournement de l'usage des *fab constraints* au-delà des besoins de la *processabilité* comme illustré dans le Tableau 4.10.

Tableau 4.10 : Classification d'usage des *fab constraints*

Type de contenu	Nombre de <i>fab constraints</i>	
Qualifications	991	Classés légèrement différemment, on retrouve les « éléments classiques de la processabilité »
Restriction des procédés	183	
Critères de qualité	83	
Appairage	54	
Gestion de boucle de contraintes temporelles	59	Ces éléments ne font pas partie de la « processabilité »

Règles d'ordonnancement	4	
Obsolètes	4	

La classification des *fab constraints* a montré que leur usage a dépassé celui de la *processabilité* pour y inclure des règles d'ordonnancement et de gestion de contraintes d'enchaînement (contraintes temporelles à respecter). Nous soulignons par ailleurs que même pour les *fab constraints* couvrant la *processabilité*, leur codage et utilisation ne répondait pas toujours à des besoins fonctionnels clairs.

Tout au long de l'exercice de modélisation, nous avons tenu à proposer des modèles garantissant la *flexibilité* nécessaire pour disposer d'une marge de « configurabilité » des règles de *processabilité*, ainsi que l'*agilité* nécessaire pour pouvoir intégrer tout nouvel élément de *processabilité*. Ces deux propriétés étant respectées, nous avons donc désormais l'assurance de disposer d'un modèle évolutif, apte à suivre facilement le rythme du changement. Aussi, avec ce Modèle de Référence couvrant la *processabilité*, nous avons pu rapprocher la vision Métier et la vision IT sur la *processabilité* (relecture très facile du besoin fonctionnel derrière chaque élément du modèle), un pas est franchi pour l'alignement. Soulignons également l'intérêt de la démarche de clarification de la *processabilité*. Grace à la définition de solides bases modèle, il est désormais possible d'évaluer « d'une façon fiable » la *processabilité* et de pouvoir la projeter dans le temps (ce qui permet d'améliorer la qualité des planifications et des calculs de capacité). D'ailleurs, les échanges durant l'analyse des *fab constraints* ont permis de soulever divers sujets annexes à la *processabilité* tel que le calcul du temps de process (nécessaire pour affiner davantage les projections de production).

Pour valider l'étude, l'aptitude des modèles proposés à couvrir les mêmes besoins que ceux des *fab constraints* actuelles a été testée. Nous avons donc d'une part développé un simulateur sous MS Access pour valider le modèle sur les données actuelles de Crolles300, et d'autre part interroger les différents experts métier quant à l'évolution des contraintes de *processabilité*. Ces études ont démontré l'aptitude des nouveaux modèles à supporter l'évolution des règles de *processabilité*. En outre, les travaux réalisés ont permis de réduire significativement le nombre des *fab constraints* de près de 1 300 à moins de 400 règles de processabilité (par la factorisation des *restrictions*, l'utilisation des *leviers*, et la retranscription des *fab constraints* par des modèles ciblés) tout en levant les limitations décrites dans la section 4.3.2.

Tableau 4.11 : Validation du modèle de gestion des restrictions des procédés

Leviers	Metro	Strip	Wet	Litho	TT	PT	Impl
TECHNO	738	46	31	7	14	13	8
STEP_LEVEL	648	66	45	35	3		
RECIPE	56	87	22	1	14		9
MASKSET	12			44			
CAPABILITY	1		20			13	
PROCESS ID				10			

PRODUCT	1			5			
ATTRIBUT_MASKSET				6			
MASK_ATTRIBUT				2			

Le Tableau 4.11 illustre la pertinence du modèle proposé pour la gestion des restrictions des procédés : nous répartissons les occurrences d’usage de chaque *levier* en fonction des ateliers et par leur usage dans les *fab constraints*. Rappelons que l’usage de ces *leviers* dans les *fab constraints* était implicite par le décodage d’autres éléments existants dans le SI (voir la section 4.3.2 pour plus de détails). Comme nous pouvons le constater, les *leviers* les plus utilisés dans les *fab constraints* sont « technologie » (TECHNO), « niveau » (STEP_LEVEL) et « recette » (RECIPE). Ils correspondent au besoin de qualification le plus fréquemment exprimé, ce qui est cohérent avec le nombre de *fab constraints* définies pour cet objectif (991 *fab constraints* en qualification, voir Tableau 4.10). Notons aussi que l’utilisation des *leviers* est principalement concentrée à l’atelier de *Métrologie* ; cela s’explique par le contexte de mix importants de produits où les équipements de mesure sont utilisés pour l’ensemble des produits. Aussi, nous remarquons que l’atelier de photolithographie est celui qui utilise le plus de *leviers*, ce qui s’explique par ses opérations critiques où il faut affiner au maximum les paramètres de *restriction*.

Sur un plan qualitatif, la méthodologie par le modèle de référence a permis une meilleure interprétation de l’alignement où les acteurs métiers se sont appropriés les modèles définis : nous avons pu refléter les attentes fonctionnelles, en respectant la complexité de l’environnement (modèles proches de la réalité) tout en simplifiant les concepts proposés. Nous développerons ces aspects qualitatifs dans le chapitre 5.

4.6 Conclusion

Satisfaire l’alignement Métier / IT au niveau opérationnel est un défi auquel sont confrontés la majorité des industries et des services. Ce défi est encore plus délicat à atteindre lorsque l’alignement visé évolue dans un environnement complexe et dynamique, tel que c’est le cas dans la fabrication des semi-conducteurs. Par l’étude de la *processabilité* dans l’unité de fabrication avancée *Crolles300* de *STMicroelectronics*, nous avons soulevé l’écart qui se creusait entre les attentes métiers et les solutions IT au travers l’approche / solution initialement apportée : les *fab constraints*. Les conséquences ont impacté les performances globales de l’organisation que ce soit au niveau métier (incapacité à projeter la *processabilité* pour alimenter les différents modules de planification et de calcul de capacité, risque de rebut produits, brouillage du sens fonctionnel, etc.), qu’au niveau IT (criticité de gestion de la *processabilité*, trajectoire d’évolution IT pas claire, saturation de l’automation pour l’évaluation de la *processabilité*, etc.). Le désalignement de la perception métier de la *processabilité* avec celle de l’IT se traduisait sur l’expression de besoins par les utilisateurs (se référant aux objets existants et solution déjà livrées) et par le « contournement » de codage (extension de manipulation des objets métiers sans expliciter leur définition).

Par l'application de la méthodologie par le Modèle de Référence, nous avons pu remettre à plat les concepts de la *processabilité* à *Crolles300* en retrouvant le sens fonctionnel initial des *fab constraints*, définir / redéfinir les objets métiers manipulés, et offrir un lien direct entre les attentes « terrain » et les solutions informatiques. Plus important, encore, cette démarche permet désormais le partage des concepts manipulés non seulement entre les Métiers et l'IT d'une part, mais également au sein même des Métiers (homogénéisation des pratiques de la *processabilité* entre les différents ateliers). Le Modèle de Référence nous a également permis de soulever d'autres problématiques telles que le calcul du temps de *process*, et la revue des éléments existants du *MES*, et d'anticiper d'éventuels besoins futurs (l'appairage). Pour *Crolles300*, le Modèle de Référence constitue aujourd'hui le standard pour les projets à dimension informatique / métier où il est mis à jour / enrichi au gré de l'évolution des besoins fonctionnels et des nouvelles problématiques remontées.

Dans ce qui suit, nous présenterons notre retour d'expérience sur la définition et l'usage du Modèle de Référence et proposerons diverses règles et bonnes pratiques que nous en avons tirées.

Chapitre 5

Retour d'expérience sur la mise en œuvre industrielle

Ce chapitre traite du retour d'expérience sur la mise en œuvre industrielle du Modèle de Référence. Nous présentons dans la section 5.1 le volet conduite de projet. Ensuite dans la section 5.2, nous définissons des règles de modélisation pour rendre efficiente la construction du Modèle de Référence.

5.1	Conduite du projet	103
5.1.1	L'étude de terrain	104
5.1.2	Évolutions du Modèle de Référence pour la <i>processabilité</i>	106
5.1.3	Générer l'adhésion des acteurs : le volet humain de la méthode	109
5.2	Les bonnes pratiques pour la mise en œuvre industrielle de la méthodologie	111
5.3	Autre application industrielle de la Méthodologie par le Modèle de Référence : le contrôle des procédés	113
5.4	Conclusion	114

5.1 Conduite du projet

Nous avons présenté dans la section 4.4 les résultats de l'application de la méthodologie par le modèle de référence pour l'étude de la *processabilité*. Nous décrivons dans ce paragraphe l'organisation autour de cette étude, les réflexions menées, ainsi qu'une illustration de l'évolution chronologique des différentes versions du modèle.

Initialement, les *fab constraints* ont été proposées, comme une solution rapide et à faible coût, pour suivre les évolutions des besoins des utilisateurs autour de la *processabilité*. Suite aux différentes difficultés, décrites dans la section 4.3.2, notamment pour la maîtrise du sens fonctionnel des besoins d'interdiction et la capacité à projeter cette maîtrise dans le temps, les *fab constraints* sont devenues une boîte noire pour la gestion de la *processabilité*. Nous schématisons cette situation dans la Figure 5.1.

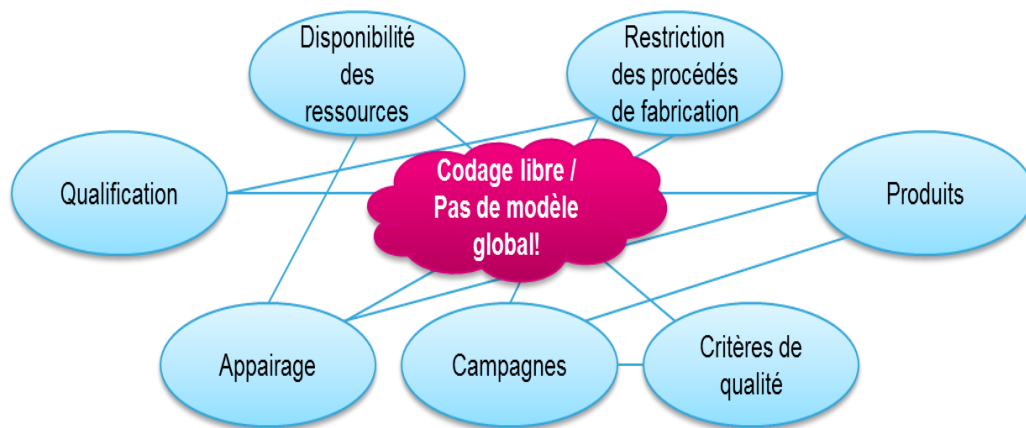


Figure 5.1 : Situation initiale de la processabilité avec les *fab constraints*

L'absence d'un modèle global pour la gestion des interdictions et le codage libre supporté par les *fab constraints* ont noyé les différents éléments agissant sur la *processabilité*. En effet, comme illustré dans la Figure 5.1, les différents concepts de la *processabilité* se confondaient par l'usage des *fab constraints*. Par exemple, pour l'orientation des lots par des *critères de qualité*, le codage informatique proposé agissait sur le périmètre de production en le limitant par les *restrictions des procédés de fabrication* (exemple du Tableau 4.8).

L'application de la méthodologie par le modèle de référence a permis de réorganiser des besoins exprimés différemment sous un seul concept. Par exemple, la gestion par compteur des équipements et la notion de *golden tool* sont maintenant régies par les *critères de qualité*. Aussi, la nature conceptuelle des ontologies et de ses modélisations apportent une flexibilité pour mettre à jour les diagrammes lors de l'analyse des *fab constraints*. En effet, l'analyse de chaque nouvelle *fab constraint* se ramène à une évaluation du modèle précédent que ce soit par son extension, ou par le rajout d'un nouveau concept. Ainsi, nous avons réussi à démystifier la modélisation, et à expliquer comment les choses se font pour atteindre l'alignement, avec un impact direct sur les pratiques quotidiennes.

Nous avons décrit dans la section 3.4 le processus de construction du Modèle de Référence. L'étude des *fab constraints* dans la section 4.4 a permis de caractériser des éléments de « gestion de projet » à prendre également en considération. Nous décrivons dans ce paragraphe la conduite de projet pour la construction d'un Modèle de Référence pour la *processabilité*.

5.1.1 L'étude de terrain

Le premier challenge pour la construction du Modèle de Référence pour la *processabilité* est de constituer l'équipe projet (le groupe d'experts) venant de la fonction Métiers et de la fonction IT. En effet, les *fab constraints* ont pris une forte connotation informatique et leur évaluation dépendait du périmètre de l'IT. La mutualisation simultanée des ressources métiers et IT pour traiter d'une problématique n'est pas une pratique courante. Pour sortir du schéma classique client / fournisseur, nous avons mis en avant d'une part les confusions fonctionnelles initiales des *fab constraints*, et les différents codages pour traiter d'un même type de besoins d'autre part. Il en ressortait qu'il fallait aligner la vision Métier et la vision IT sur des objectifs clairs et partagés : l'équipe projet est ainsi « officiellement » constituée !

Durant les investigations terrains, nous avons dû nous armer de patience pour comprendre et formaliser ce que les utilisateurs cherchaient à exprimer. La reformulation de ces besoins, leur répartition par groupe d'usages (confrontation, similitude, cas spécifique, etc.), couplée à la complexité des *fab constraints*, ont rajouté une difficulté supplémentaire : le retour aux faits et aux données permettaient de « cadrer » les échanges. L'objectif était d'identifier les besoins effectifs, et de bien distinguer les situations génériques (entre les groupes d'utilisateur) et les situations spécifiques à chaque groupe.

À titre d'exemple, nous avons remarqué une disparité des usages de la *capabilité* selon les ateliers et parfois au sein d'un même atelier. Nous rappelons que la *capabilité* fait le lien logique entre les machines et les technologies. Chaque étape « process » de la route (brique, niveau, etc.) fait appel à une *capabilité*. Chaque équipement a une ou plusieurs *capabilités* « actives » à l'instant t. Notion plus volatile que la qualification et indépendante de cette dernière (un équipement peut être « qualifié » alors que sa *capabilité* est dévalidée), la *capabilité* autorise le passage du lot sur l'équipement. Au premier abord, l'interprétation « logique » de l'usage de la *capabilité* est de gérer la restriction des procédés de fabrication. Cependant, la pratique terrain est complètement différente comme illustré dans le Tableau 5.1

Tableau 5.1 : Exemple de différents usages de la *capabilité*

Equipement	Description	Expression
WSU3002	LOT A PASSER SUR WOASI OU WFC3001-CGE_IPD INTERDIT SUR WSU3002	FABLOTEXT.REQUIREDCAPABILITY LIKE 'PREFUR_HIDOPE_C090' AND FABLOTEXT.RECIPENAME LIKE 'B_RCA25RSSR_MOFF' AND EXISTS (SELECT IMPLEMENTID FROM FWPRPINFO, FWLOT_N2M WHERE FWLOT.SYSID = FWLOT_N2M.FROMID AND FWPRPINFO.SYSID = FWLOT_N2M.TOID AND

		IMPLEMENTID LIKE 'B_CGE_IPD_DEFINITION%')
WFC3001	LOT IMG175 et I75HP INTERDIT en CLEAN SPACER	FWWIPSTEP.STEPNAME LIKE 'CLEAN_PREFUR_HIDOPE%' AND FWWIPSTEP.SUBPLANID LIKE 'O_DEP_TEOS%' AND FWWIPSTEP.PROCESSOPERATIONID LIKE 'O_DEP_TEO1_SPAC%' AND EXISTS (select PRODUCTNAME from FWPRODUCTVERSION where FWPRODUCTVERSION.PRODUCTFAMILY IN ('IMG175','I175HP') ' AND FWLOT.PRODUCTNAME = FWPRODUCTVERSION.PRODUCTNAME)
PTSYS01	Capabilités WLRC% interdites sur PTSYS%. À processer sur PWLRC01	FABLOTEXT.REQUIREDCAPABILITY LIKE 'WLRC%' AND EXISTS (SELECT 1 FROM C2_PROCESSPLANCONF, FWPROCESSPLAN where FWLOT.PLANNAME=FWPROCESSPLAN.NAME AND FWPROCESSPLAN.SYSID=C2_PROCESSPLANCONF.PARENT AND C2_PROCESSPLANCONF.TECHNO_NUM='12A')

Le Tableau 5.1 reprend un exemple de deux pratiques différentes de l'usage de la *capabilité* au sein du même atelier (l'atelier « WET » ou « nettoyage ») pour les équipements *WSU3002* et *WFC3001*, et encore un troisième usage différent au sein de l'atelier « Test Paramétrique » pour l'équipement *PTSYS01*. Pour l'équipement *WSU3002* de l'atelier WET, l'usage de la *capabilité*, associée à la *recette*, a comme but de restreindre le périmètre de la production afin d'orienter le lot exclusivement soit vers la famille d'équipement *WOASI* ou soit vers l'équipement *WFC3001*. Ainsi, derrière cet usage de la *capabilité* se cachait le concept de *critères de qualité* afin d'orienter le lot vers des équipements en particulier. Toujours pour l'atelier WET, pour l'équipement *WFC3001*, la notion de la *capabilité* (décodage de l'objet *stepname* afin de retrouver, « par contournement », la *capabilité* requise) est utilisée dans un schéma « classique » d'interdiction de « process » pour la famille de produits *IMG175* et *I175HP*. Ici aussi, l'interdiction par le levier de familles de produits soulève un questionnement : s'agit-il d'une façon indirecte de cibler le levier « technologie », afin de gérer une déqualification ? Seule une analyse encore plus approfondie permet de lever ce questionnement. Quant à l'usage de la *capabilité* pour l'atelier Tests Paramétrique et l'équipement *PTSYS01*, deux interprétations sont également possibles : (i) soit il s'agit d'une restriction des procédés de fabrication, ou (ii) soit il s'agit d'orienter le lot par des critères de qualité vers l'équipement *PWLRC01* en interdisant le passage des lots sur l'ensemble de la famille d'équipement *PTSYS*.

L'interprétation des données sur les exemples du Tableau 5.1 atteint rapidement ses limites. De même, l'investigation côté IT pour comprendre le codage ne permet pas de comprendre complètement l'essence des spécifications. Ainsi, plusieurs sessions de travail ont été organisées avec les acteurs des ateliers qui ont contribué à la définition de ces *fab constraints* mais aussi avec ceux qui les utilisent au quotidien. Lors des premières réunions, les Experts Méthodes n'avaient pas encore analysé l'ensemble des *fab constraints* et n'avaient pas rencontré tous les acteurs de tous les ateliers concernés. Ainsi, lors du démarrage des sessions de travail, il était difficile de comprendre l'usage fonctionnel ayant prévalu lors de la création des *fab constraints*. La tâche n'était pas simple vu que (i) le discours des équipes des ateliers était exprimé via les *fab constraints* et (ii) la connaissance des Experts Méthodes sur les éléments

de la *processabilité* était encore similaire aux éléments décrits dans la section 4.2. L'effet du temps avec la maturation de l'analyse, la prise de recul sur le contenu de l'ensemble des *fab constraints*, et surtout les échanges répétés avec les ateliers, ont permis de mieux cerner les besoins que les utilisateurs cherchaient à couvrir (le besoin réel). Les premières propositions ont commencé à émerger pour la définition des concepts fonctionnels autour de la *processabilité* : les appairages, les campagnes, etc. (voir la section 4.4 pour plus de détails). Bien que les premières propositions de ces concepts fonctionnels ne fussent pas encore suffisamment claires, la confrontation avec le terrain a permis de les affiner par itération. Aussi, avec ces embryons de solutions fonctionnelles, il devenait de plus en plus facile de discuter avec les opérationnels : l'orientation de la réflexion en faisant abstraction des *fab constraints* et en se référant aux concepts fonctionnels a permis aux Experts Méthodes d'affiner leurs propositions, et de mieux comprendre « ce qui se cachait derrière » l'usage des *fab constraints*.

Ainsi, en reprenant les exemples du Tableau 5.1, il s'est avéré que le but recherché était à chaque fois de gérer la qualification des équipements. Cela peut paraître surprenant à plusieurs niveaux :

- La qualification au sein du même atelier WET est gérée par deux codages différents,
- Le descriptif accompagnant la *fab constraint* à l'atelier WET de l'équipement *WSU3002* induit le lecteur en erreur : tout laisse à penser qu'il s'agit d'une orientation des lots alors qu'effectivement les utilisateurs visaient une déqualification ! La même remarque est valide pour l'atelier de Test Paramétrique concernant l'équipement *PTSYS01*,
- Le descriptif accompagnant la *fab constraint* pour l'équipement *WFC3001* de l'atelier WET indique plutôt une *restriction de procédé* (et non pas une qualification),
- Un troisième type de codage est proposé pour la qualification pour l'atelier Test Paramétrique.

Sachant qu'il existait plus de 1 300 *fab constraints* à analyser, cet aperçu limité à ces trois exemples de *fab constraints* rend compte de la complexité de la tâche de l'étude terrain pour arriver à identifier les besoins des utilisateurs, les reformuler, et pour la définition des concepts fonctionnels.

5.1.2 Évolutions du Modèle de Référence pour la *processabilité*

Lors de l'étude des *fab constraints*, plusieurs itérations ont été nécessaires pour chacune des étapes de recueil des besoins, de définition des scénarios génériques et concepts fonctionnels associés, et enfin de définition des ontologies. Le cheminement entre les étapes n'a pas suivi un cheminement linéaire (validation d'une étape puis passage à la suivante). En effet, la compréhension du terrain s'est affinée à fur et à mesure de la définition des scénarios : un blocage pour la définition d'un concept fonctionnel permettait de relever une incohérence au niveau des scénarios (et sollicitait donc un retour vers les utilisateurs), etc. comme illustré dans l'exemple de la section 5.1.1. Ces allers retours entre les différentes étapes, et les avis constructifs des experts méthodes et IT, ont permis d'assurer une cohérence entre les concepts fonctionnels et de couvrir tous les scénarios identifiés. Ces allers / retours entre la vision métier (besoin, scénario, concept fonctionnel) et la vision IT (concept fonctionnel, ontologie) ont permis de construire graduellement le Modèle de Référence pour la *processabilité*.

Lors de la définition des ontologies (découlant des concepts fonctionnels), nous avons pu intégrer de nouveaux objets métiers d'une « façon fluide » : ces ajouts n'ont pas perturbé la structure du

modèle ou induit des incohérences / redondances. Il faut toutefois noter le nombre d'itérations nécessaires à ce résultat a dépassé la trentaine ! Cette facilité à mettre à jour les ontologies ainsi que la clarté des concepts fonctionnels constituaient les éléments majeurs pour la validation du modèle de référence (avec le fait qu'il couvrait les besoins des *fab constraints* !). En effet, la question de validation demeurait qualitative et nous avons convenu d'une évaluation à travers la capacité à facilement intégrer des modifications (une bonne solution fonctionnelle est une solution qui peut évoluer naturellement !). Aussi, lors de la définition des ontologies, bien que nous fussions dans une posture visant à définir un système idéal sans contraintes d'implémentation, nous demeurions rattachés à des objets existants du SI. L'intérêt était avant tout de garder une continuité de « compréhension ».

Comme cas illustratif, reprenons l'exemple de la *capabilité* utilisé dans les *fab constraints* du Tableau 5.1. Lors du passage du concept fonctionnel à l'ontologie, il fallait représenter la *capabilité*. Une des premières itérations du modèle est schématisée dans la Figure 5.2.

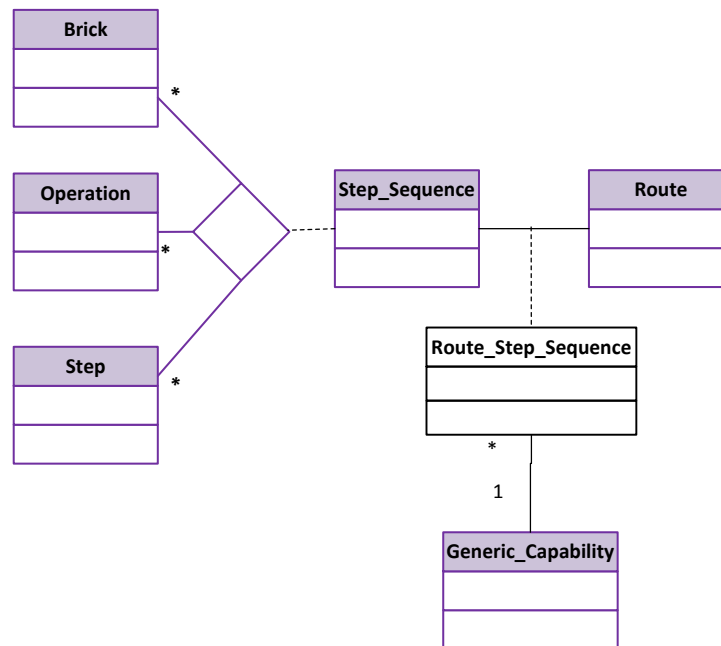


Figure 5.2 : Une des premières itérations du modèle pour représenter la capacité

Pour modéliser la *capabilité*, il fallait la positionner par rapport au modèle de la *route*, chaque étape « process » de la route (brique, niveau, etc.) faisant appel à une *capabilité*. Dans la Figure 5.2, une *capabilité générique* a été pensée pour couvrir les éléments de la *route*. La *route* est constituée d'une *séquence d'étapes* qui regroupe le triplet (*brique*, *opération*, *étape*). À cette étape de la modélisation, et vu le manque de recul, une association n-aire a été adoptée pour dépasser la confusion initiale. Afin d'identifier la *séquence d'étapes d'une route*, une classe association a donc été définie : elle porte une et une seule *capabilité générique*, même si la *capabilité générique* peut être commune à plusieurs *séquences d'étapes d'une route*. Au fur et à mesure des itérations, de l'analyse terrain, et les échanges avec les équipes IT, nous avons convenu d'une nouvelle structure du modèle de la *route*, moins confuse (pas d'association n-aire) et plus « riche » en ce sens qu'elle intègre plus d'objets métiers. La principale

différence, comme illustré dans la Figure 4.10, consiste à définir un unique triplet (*brique*, *opération*, *étape*) par *route*. Cela a permis d'apporter une meilleure lisibilité du modèle par ses liens avec le *produit* et le *niveau*. À la fin de la définition du nouveau modèle global de gestion de la *processabilité* (voir section 4.4), nous avons constaté que la *capabilité* n'apparaissait plus dans aucun de ces éléments ! En effet, la *capabilité* était un artefact qui, initialement, permettait de gérer correctement la *processabilité*. Cependant, avec l'introduction des nouvelles règles métiers, la *capabilité* n'était plus assez discriminante pour agir sur les éléments d'interdiction : son interprétation portait à confusion et elle était trop générique pour pouvoir cibler des besoins précis d'interdiction. Les nouveaux éléments que nous avons proposés sont plus précis et amènent un niveau de contrôle plus fin, permettant ainsi de mieux couvrir les besoins fonctionnels liés à la *processabilité*.

Comme décrit en début de cette section, les évolutions des étapes du Modèle de Référence n'ont pas suivi une séquence linéaire : valider d'abord les scénarios, ensuite valider les concepts fonctionnels, et enfin valider les ontologies. Nous avons à maintes reprises dû reprendre les concepts fonctionnels à cause d'un blocage lors de la modélisation des ontologies. À titre d'exemple, reprenons le cas de l'*appairage*. Nous rappelons que l'*appairage* permet de maîtriser la variabilité inter-équipement pour les technologies les plus avancées (spécifications de production atteignant la limite de la physique) et de gérer les flux réentrants. Dans un premier temps, l'*appairage* a été considéré comme un élément faisant partie du modèle de la *route* : pour déterminer l'*appairage*, il fallait seulement identifier la condition pour créer une bifurcation / nouvelle branche dans la route et identifier les prochaines *séquences d'étapes* impactées !

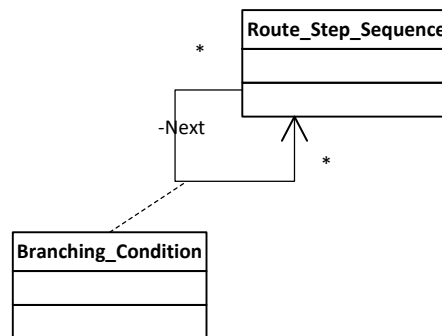


Figure 5.3 : Première modélisation pour l'*appairage*

Nous illustrons nos propos par la Figure 5.3. L'auto-association sur la *séquence d'étapes de la route* permet de créer un « saut » entre les *étapes*. La création de la nouvelle branche est sujette à condition, condition portée par la classe association « *branching condition* ». En revenant vers les opérationnels et l'étude de scénarios, cette modélisation a amené une situation de blocage car elle ne permettait de prendre en compte que les *appairages* de type *process*, alors qu'il fallait également traiter l'*appairage équipement*. Nous nous sommes alors rendu compte que, fonctionnellement, l'*appairage* ne fait pas partie du modèle de la *route*. Il s'agit d'une extension du modèle des *critères de qualité* : en effet, il fallait identifier les indicateurs de performance à respecter, et identifier les équipements satisfaisant les seuils définis (voir la section 4.4.6 pour plus de détails ainsi que pour la version finale du modèle de l'*appairage*). Ainsi, nous avons dû revenir depuis l'ontologie vers le terrain pour affiner notre réflexion.

Comme le démontre cet exemple, les itérations sont donc à réaliser à la fois pour chaque étape de construction du modèle de référence, mais aussi pour le passage d'une étape à la suivante (modélisation d'un nouveau besoin fonctionnel, extension du périmètre modélisé).

Il faut souligner que durant cet exercice, c'est la définition des concepts fonctionnels qui a constitué la phase critique. En effet, elle requerrait une prise de recul et une importante capacité de conceptualisation. Comme nous l'avons décrit dans la section 4.4, nous constatons que la nuance entre ces concepts est parfois subtile, et il faut arriver à trouver un consensus sur les solutions proposées et la définition des termes utilisés (voir exemple du Tableau 4.4 dans la section 4.4.1). Il est toujours intéressant d'utiliser des exemples et des données factuelles permettant de fédérer « rapidement » les différents intervenants et d'établir un consensus. Nous avons également utilisé un outil collaboratif (du type Wiki) afin de renseigner les différentes définitions des objets manipulés et les attentes des modèles définis. Cela nous a également aidé à mieux véhiculer la connaissance au travers des ontologies, étant donné que plusieurs interprétations pouvaient leur être associées en fonction du lecteur.

5.1.3 Générer l'adhésion des acteurs : le volet humain de la méthode

Lors de la construction du Modèle de Référence pour la *processabilité* et de sa validation sur l'interprétation des *fab constraints*, nous avons remarqué une certaine réticence des utilisateurs à supprimer ces dernières. En effet, malgré tous les efforts d'investigation terrain et d'interprétation du code SQL, les enjeux couverts par les *fab constraints* (risque de rebuts produits, dégradation des procédés, etc.) rendaient les opérationnels très précautionneux quant à leur suppression. Pour être envisageable, le changement devait être géré par les métiers pour propager les nouveaux concepts fonctionnels de la *processabilité* (et rassurer les utilisateurs), et être en même temps associé à une approche IT pour sécuriser la transition (graduelle) vers un nouveau système sans *fab constraints*.

Le Modèle de Référence a été porteur d'« enthousiasme » général (Métiers et IT) car, en plus d'avoir traité la *processabilité*, il a permis de remettre à plat des notions qui manquaient de clarté (telles que les modèles routes, produits, etc., voir paragraphe 4.4.2) et d'aborder de nouvelles problématiques (temps de process, *process control*, etc.). Il a d'autre part permis de donner une vision prospective des tendances futures. En effet, en suivant le Modèle de Référence, les développements IT d'aujourd'hui (même mineurs) permettront de préparer le futur (avec des coûts moins importants puisque l'évolution du besoin aura été anticipée).

Le Modèle de Référence permet de fédérer les différentes visions métiers et IT autour d'une même cible, à l'interface entre le domaine Métier et le domaine IT comme indiqué sur la Figure 5.4. Pour la prise en compte des demandes du domaine Métier, les Experts Méthodes mènent les études de terrain à deux niveaux : (i) auprès des acteurs de la même organisation, et en fonction du périmètre de l'étude, et (ii) entre les différentes organisations / services. En menant cette analyse, la principale valeur ajoutée des Experts Méthodes est de s'assurer de la cohérence des demandes et des attentes entre les différentes parties prenantes. Cela offre une vision globale et permet aussi de partager les bonnes pratiques quand cela est utile. Au niveau Métier, nous disposons alors d'une vision commune, claire et cohérente du cap

fonctionnel, qui une fois partagée avec les experts IT offre à ces derniers une vision globale sur l'envergure des projets de transformation.

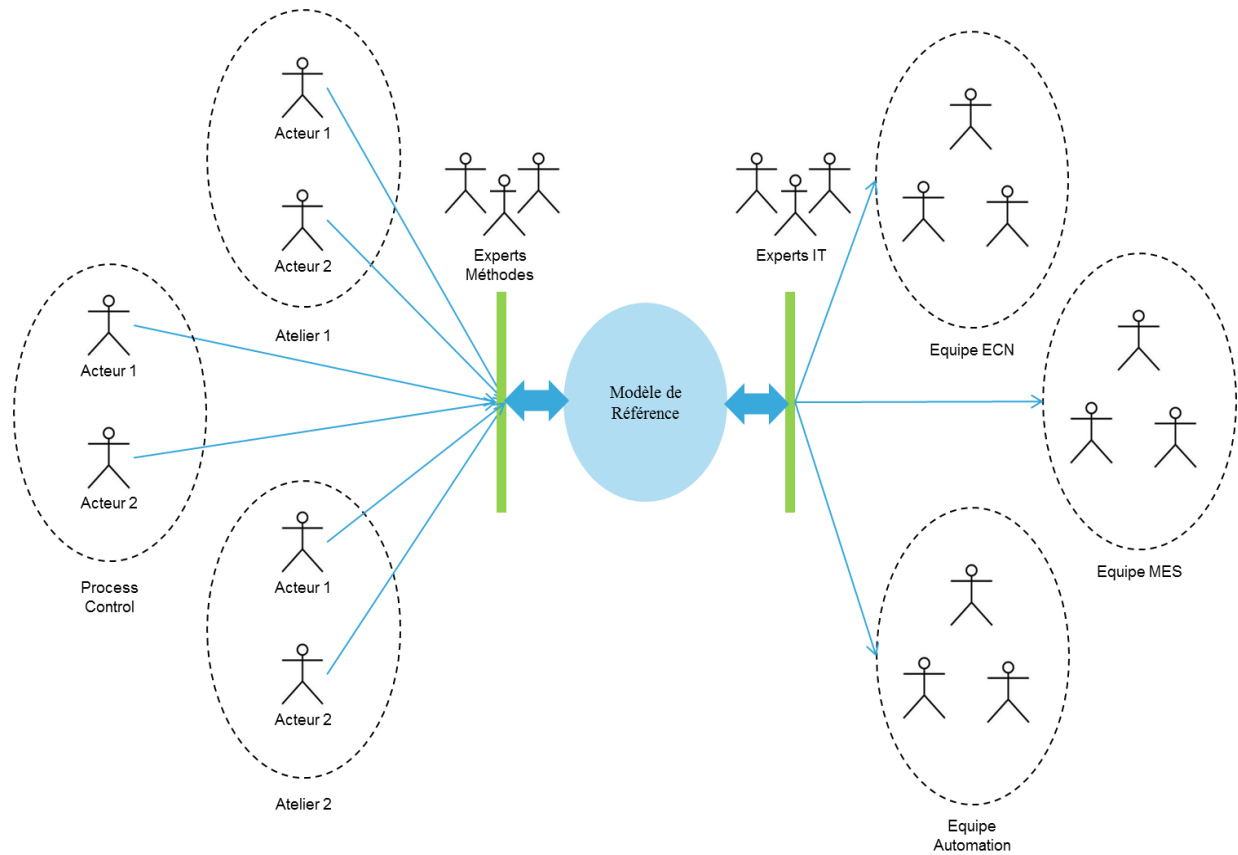


Figure 5.4 : *Apport fédérateur du Modèle de Référence*

L'adoption du cap fonctionnel par les experts IT leur permet alors de définir la trajectoire d'évolution du SI et de gérer beaucoup plus efficacement les ressources pour respecter cette trajectoire : mutualisation entre les différentes équipes IT et synergies entre les projets sont pilotées par les Experts IT.

De façon générale, nous tenons à souligner que la méthodologie par le Modèle de Référence est à recommander pour tout contexte industriel / service qui se caractérise par (i) une forte automatisation de ses processus opérationnels, (ii) une complexité importante de ses processus de fabrication, et (iii) un rythme rapide et fréquent d'évolution des processus.

Les allers / retours entre les différentes phases de construction du Modèle de Référence rendent délicat l'exercice de modélisation et de conceptualisation. Pour y remédier, nous proposons dans la section suivante les principales règles ou bonnes pratiques que nous avons pu tirer de notre expérience de mise en œuvre d'un Modèle de Référence.

5.2 Les bonnes pratiques pour la mise en œuvre industrielle de la méthodologie

Nous rappelons que la construction du Modèle de Référence passe par trois phases principales : le recueil des besoins, la définition des scénarios et des concepts fonctionnels associés, et la définition des ontologies. Cette construction nécessite un important travail de conceptualisation et de modélisation. Durant l'application de la méthodologie pour l'étude de la *processabilité* dans la section 4.4, nous avons défini et suivi des « règles » pour assurer au mieux le déroulement du projet. Ces bonnes pratiques ont permis de perfectionner la méthodologie, améliorant ainsi la qualité des résultats atteints. Nous détaillons ces recommandations dans ce qui suit.

Ce qui se conçoit bien s'énonce clairement !

D'abord, lors du recueil des besoins, il est important que l'équipe projet puisse prendre du recul sur les demandes des acteurs opérationnels : un regard nouveau permet de pointer des dysfonctionnements (qui ne sont plus ainsi considérés faute « d'habitude d'usage / fait établi »). Néanmoins, l'expertise et l'expérience de l'équipe projet sont des critères primordiaux car ce sont elles qui permettent de mesurer à leur juste valeur les enjeux et les attentes des utilisateurs. Les exemples de la suppression de la notion de capacité (section 5.1.1) et de l'orientation des lots selon les critères de qualité (section 4.4.4) sont, à ce titre, symptomatiques.

Toujours pour cette phase, nous recommandons de confronter le plus souvent possible les besoins des utilisateurs à des données factuelles : la quantification des problématiques rencontrées permet de donner le juste poids pour les attentes (en fonction de leur redondance et de leur impact sur l'organisation).

Nous recommandons également de toujours faire exprimer les besoins dans un langage qui soit dissocié des outils manipulés. Lors de certaines réunions de consolidation des besoins, il a par exemple été nécessaire d'interdire l'utilisation de certains termes, comme par exemple le mot « recette » qui suivant l'utilisateur et le contexte ou l'outil considéré revêt des sens très différents. La définition d'un glossaire commun à l'ensemble des acteurs du projet est également vivement recommandée. Dans le même ordre d'idée, l'environnement des entretiens est important. En éloignant les utilisateurs de leur outil de travail, on les induit naturellement à conceptualiser un peu plus leur besoin et donc à exprimer la façon avec laquelle ils devraient travailler plutôt que celle dont ils travaillent effectivement. L'objectif étant d'identifier la situation fonctionnelle cible, les réunions étaient principalement animées loin de l'outil de travail pour la partie étude / compréhension de l'existant.

Une approche prospective pour savoir détecter les évolutions futures

Durant ces interviews, l'équipe projet doit avoir une attitude prospective pour détecter efficacement les potentielles tendances et évolutions futures. Nous sommes vraiment dans la phase préliminaire à la conduite du changement et il existe à ce niveau une réelle possibilité de commencer à orienter l'expression des besoins. La définition du modèle d'appariage dans la section 4.4.6 illustre cette

situation. En effet, l'appairage ne couvre qu'un faible périmètre des flux de production puisqu'il se limite aux étapes les plus critiques des technologies avancées. Il est cependant intéressant d'anticiper la croissance de ce besoin avec le développement des nouvelles technologies.

En centralisant les demandes recueillies lors des interviews des différents acteurs métiers l'équipe projet est la mieux à même de définir une vision de l'avenir. Même si cette capacité de projection est conditionnée par d'autres éléments qui ne sont pas nécessairement maîtrisables à l'instant de l'étude (les changements de process en fonction des évolutions technologiques, nouvelles règles métiers quasi quotidiennes, etc.), ce n'est pas la qualité qui est visée (on ne cherche pas un résultat assuré à 100% !), mais plutôt l'état d'esprit qui prévaut lors de cette anticipation : pouvoir identifier les nouvelles problématiques. Une meilleure expression de ces potentialités, permettra en outre de ne pas courir le risque de biaiser les futurs besoins (l'objectif est plutôt de définir une trajectoire cohérente) !

Pour suivre cette même logique, nous préconisons l'utilisation de scénarios génériques, l'objectif étant de définir les concepts fonctionnels qui couvriront les scénarios actuels et les scénarios futurs les plus plausibles. L'exemple le plus pertinent est sans doute celui de la modélisation des *restrictions des procédés* dans la section 4.4.4. : le choix du mécanisme de *levier* avec une action de combinaison d'opérateurs logiques offrant la possibilité d'intégrer tout nouvel élément « process » pouvant impacter la qualité de la production.

Réfléchir par « voisinage » pour mettre en lumière les opportunités potentielles

Dans la section 5.1, nous avons montré que les définitions des scénarios, de leurs concepts fonctionnels associés, ainsi que des ontologies qui en découlent sont fortement liées et nécessitent plusieurs itérations (et plusieurs allers / retours d'une phase à une autre). L'objectif est de mieux assimiler les besoins recueillis, et de définir les meilleurs choix de conceptualisation et de modélisation.

Dans un contexte régi par des évolutions permanentes (cas des fabricants de semi-conducteurs à forte diversité de produits), en plus de l'approche prospective, il est intéressant de suivre une approche de réflexion par voisinage. Cette dernière consiste à étendre l'analyse d'une problématique traitée à d'autres qui pourraient y être rattachées. Nous sommes alors dans une attitude d'extension du périmètre d'analyse et non pas dans une phase d'anticipation. Par exemple, nous avons remarqué lors de l'étude des *fab constraints* la nécessité de mieux maîtriser le temps de process afin d'affiner le calcul de planification des lots (en plus de pouvoir évaluer et projeter la *processabilité*). Même si le risque est d'étendre les analyses et de ne plus maîtriser le périmètre, nous rappelons qu'un des objectifs du Modèle de Référence est de clarifier la trajectoire fonctionnelle. Sachant qu'il s'agit d'une étude fonctionnelle qui n'engage pas des coûts informatiques (étude fonctionnelle à coût « acceptable »), il nous paraît alors pertinent d'intégrer tout élément d'analyse qui permettra de mieux « cadrer » cette trajectoire puisque, cela permettra dans le futur, avec relativement peu d'efforts (développements informatiques), d'intégrer des notions qui paraissaient irréalisables lors de leur définition initiale.

Une règle simple

Lors de l'exercice de modélisation, nous avons toujours tenu à modéliser les concepts fonctionnels le plus génériquement possible. L'intérêt est de préserver la pertinence des concepts fonctionnels face à la multitude des scénarios, de pouvoir homogénéiser les pratiques parmi les différents groupes d'utilisateurs. Certes, la difficulté est de pouvoir traiter les scénarios spécifiques : des exceptions peuvent être tolérées si elles sont justifiées et s'il y a un consensus de l'équipe projet (exemple de l'appairage dans la section 4.4.6 pour gérer les technologies les plus avancées).

Quant à la difficulté du passage des concepts fonctionnels à l'ontologie correspondante, nous recommandons de suivre un lien direct ! Cela consiste tout d'abord à créer et à manipuler des objets métiers qui donnent un sens au concept fonctionnel. Par exemple, créer l'objet métier « niveau » bien que nous puissions l'identifier par le décodage de l'objet métier « recette ». En effet, la lecture de l'ontologie doit permettre de véhiculer le sens des concepts fonctionnels : nous nous interdisons les contournements d'usage. Nous avons donc suivi une règle classique lors de la définition des objets métiers afin d'éviter tout risque de confusion : ***deux objets (concepts) différents ne doivent pas avoir la même définition, et deux définitions différentes ne doivent pas désigner le même objet (concept).***

5.3 Autre application industrielle de la Méthodologie par le Modèle de Référence : le contrôle des procédés

Le Modèle de Référence n'est pas supposé traiter uniquement la *processabilité* : il est amené à couvrir les différents besoins métiers pour mettre l'accent sur leur lien / échange. C'est un moyen de communication entre les Métiers d'une part, et aussi entre les Métiers et l'IT d'autre part. Un nouveau projet autour des outils pour gérer le contrôle des équipements et l'échantillonnage des lots de production a été démarré dans la continuité du Modèle de Référence pour la *processabilité*.

En effet, l'augmentation du nombre de produits (références différentes) à réaliser sur la ligne de fabrication Crolles300, a complexifié les problématiques pour le contrôle des procédés : limitation de la capacité de métrologie, dérive des plans de mesures (pertinence, échantillonnage constant, dilemme entre régulation et contrôle, etc.). L'automatisation de la ligne et l'évolution du système de production imposent au système de contrôle d'être dynamique et de prendre en compte automatiquement des critères tels que la maturité des technologies ou le type de produits, pour pouvoir gérer les différents risques à maîtriser (types de mesures différents suivant le risque, gestion des événements du type changement de recette, pannes des équipements, etc.). L'objectif est d'intégrer au *MES (Manufacturing Execution System)* les nouvelles exigences d'échantillonnage variable et de contrôle.

Plusieurs travaux portant sur l'échantillonnage dynamique ont été réalisés pour l'unité de Crolles300 (Nduhura Munga, et al., 2012). Le challenge, entre autres, est désormais de pouvoir intégrer ces solutions algorithmiques au sein des SI existant pour la gestion de production. Pour ce faire, nous avons appliqué la méthodologie par le Modèle de Référence au cas de la gestion du Plan de Contrôle, c'est-à-dire pour :

- Définir les perspectives d'évolution fonctionnelles du SI,

- Donner une visibilité sur les interactions entre les différents constituants du système de contrôle.

Dans la même dynamique que pour le Modèle de Référence pour la *processabilité*, un groupe de travail a été constitué. Il était formé par les Experts Méthodes, les acteurs métiers du *Process Control*, et les référents IT. Une première phase d'avant-projet a été initiée pour préparer l'étude terrain. Cette phase a permis de poser les axes d'investigation :

- Définition des critères d'éligibilité pour le contrôle d'un lot. Il s'agit ici de définir les caractéristiques génériques d'un lot pour qu'il soit sujet au contrôle. À titre d'exemple, seraient pris en compte la maturité du produit, le type de lot (R&D, client final, etc.), sa priorité, etc.
- Définition de l'origine de la demande de contrôle (ou de mesure !). L'objectif ici est d'identifier l'acteur responsable du déclenchement du plan de contrôle. À titre d'exemple, cela peut être un contrôle standard faisant partie de la *route*, un contrôle « de vérification » requis suite à une alarme (FDC, SPC, etc.), ou encore un besoin de régulation du processus de fabrication.
- Définition des vecteurs de la demande de contrôle. Permet d'identifier le type de l'entité qui va subir le contrôle. Par exemple le contrôle peut être réalisé sur des lots de production, des témoins / NPW, ou sur des composants équipements (par exemple témoins d'usure).
- Définition des caractéristiques de l'échantillonnage. Il s'agit d'identifier le type d'échantillonnage à réaliser : standard / statique (défini dans la *route*) / dynamique, lots concernés (*full mapping*, plaquettes spécifiques, etc.).
- Identification des clients des résultats de mesure. L'intérêt ici est de déterminer les acteurs / systèmes qui vont être alimentés par les mesures. Cela peut être pour contrôler un équipement ou un procédé de fabrication, mais également pour réaliser des analyses R&D ou d'ingénierie, livrer des rapports aux clients, ou calculer des limites de contrôles, etc.

Ces premiers axes d'investigation ont permis de poser les premières briques pour le pilotage du projet. La seconde phase vise à étudier le comportement des scénarios d'usage en contrôle des procédés face à ces questionnements. Les premières études terrain ont démarré et le projet est encore en cours de définition.

5.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé l'aspect « conduite de projet » pour la construction du Modèle de Référence. Elle nécessite une approche itérative au niveau de chacune de ses étapes (recueil des besoins, définition des scénarios et des concepts fonctionnels associés, et définition des ontologies) et aussi des allers / retours d'une étape à une autre. En effet, ces passages répétés permettent de mieux comprendre les besoins des utilisateurs et ainsi de mieux affiner les modélisations proposées. Les enjeux projets à relever se résument à la capacité à monter un groupe de travail multidisciplinaire (au niveau métiers et au niveau IT) et qui arrive à communiquer. En effet, pour la modélisation, le mot d'ordre est le consensus. La validation du modèle passe par le consensus car il s'agit d'une évaluation qualitative par rapport à l'aptitude du modèle à intégrer les nouveaux besoins.

Nous avons également présenté les règles et bonnes pratiques qui nous semblaient essentielles pour réussir l'exercice de modélisation. Nous les synthétisons par la capacité à prendre une attitude prospective et à étendre la réflexion lors de l'analyse des besoins.

Conclusion générale et perspectives

La capacité d'une entreprise à évoluer plus aisément que ses concurrentes dans un contexte complexe, dynamique et imprévisible lui offre un avantage indéniable. Dans ce contexte, et avec l'automatisation croissante de la fabrication et des processus décisionnels, la valeur d'usage des SI est renforcée et devient un atout pour l'entreprise, à condition d'atteindre l'alignement Métier / IT et de pouvoir le maintenir. Cependant, la pratique et la recherche demeurent insatisfaisantes pour apporter des réponses efficaces sur la façon d'atteindre l'alignement dans cet environnement.

Les travaux de cette thèse, développés dans le cadre d'une industrie de haute technologie, la fabrication de composants semi-conducteurs, se veulent une contribution à l'ingénierie de l'alignement. C'est un secteur qui a connu plusieurs transformations technologiques et économiques qui ont impacté la structure même de l'outil de production et la stratégie de sa gestion. L'automatisation des moyens de fabrication et leur pilotage informatique sont devenus un standard étant donné les enjeux liés à la gestion de la complexité et la criticité des opérations de production. Confronté à la dynamique des évolutions non anticipées des métiers, nous avons constaté un écart d'alignement entre la réalité des besoins métiers et la vision IT correspondante. Dans une industrie aux limites des capacités technologiques (système de production aux limites des lois de la physique) et où la compétition est extrêmement intense, le levier organisationnel constitue un atout majeur de différenciation par rapport à la concurrence. Ainsi, il est indispensable de disposer d'un SI qui porte en lui l'aptitude à évoluer rapidement au plus près des besoins des utilisateurs et à garantir une évolution cohérente de la trajectoire des SI et du cap fonctionnel des métiers. Cette thèse a pour ambition d'offrir le support méthodologique pour atteindre un alignement au niveau interne, par une intégration fonctionnelle, entre les domaines Métier et IT, et le maintenir dans un environnement complexe et dynamique.

Sur la base d'une étude bibliographique de l'état de l'art dans les domaines de l'alignement, et suite à nos constatations terrains des spécificités de la fabrication des composants semi-conducteurs, notre proposition pour l'alignement consiste, dans un premier temps, à dissocier la vue Métier de la vue IT afin de garantir l'intégrité de l'expression des besoins. Puis, dans un second temps, la méthodologie vise à synchroniser les deux vues autour du Modèle de Référence. Par une approche incrémentale et itérative, le Modèle de Référence traduit les besoins des utilisateurs, sans être contraint par les solutions informatiques existantes, et définit la cible conceptuelle à atteindre pour le SI. Nous avons également décrit l'organisation humaine nécessaire pour la construction du Modèle de Référence. Elle consiste à réunir des experts Métiers et des experts informatiques pour « filtrer » l'expression des besoins, et faire converger les interprétations des concepts métiers et IT manipulés, en mettant l'accent sur l'identification de besoins effectifs des utilisateurs. Nous avons décrit les étapes nécessaires pour construire le Modèle de Référence en partant du recueil des besoins, en passant ensuite par leur

formalisation au travers de scénarios, puis la définition des concepts fonctionnels constituant les solutions fonctionnelles correspondantes, et enfin la définition d'une ontologie.

Par l'étude de la *processabilité* pour l'unité de fabrication *Crolles300* de *STMicroelectronics*, nous avons mis en évidence l'écart qui se creusait entre les attentes métiers et l'approche / solution IT initialement proposée : les *fab constraints*. Nous avons également montré comment leur déploiement et leur utilisation parfois mal adaptée, ont impacté les performances globales de l'organisation que ce soit au niveau métier (incapacité à projeter la *processabilité* pour alimenter les différents modules de planification et de calcul de capacité, risque de rebuts produits, brouillage du sens fonctionnel, etc.), qu'au niveau IT (criticité de gestion de la *processabilité*, trajectoire d'évolution IT pas claire, saturation de l'automation pour l'évaluation de la *processabilité*, etc.). Le désalignement des perceptions Métier de la *processabilité* et IT se traduisait côté utilisateurs en une expression biaisée des besoins (ceux-ci se référant aux objets existants et aux solutions déjà livrées) et côté IT par le « contournement » de codage (extension de manipulation des objets métiers sans expliciter leur définition).

Par l'application de la méthodologie par le Modèle de Référence, nous avons pu (i) remettre à plat les concepts de la *processabilité* à *Crolles300* en retrouvant le sens fonctionnel initial des *fab constraints*, (ii) définir / redéfinir les objets métiers manipulés, et (iii) offrir un lien direct entre les attentes terrains et les solutions informatiques. L'utilisation de la méthodologie a notamment permis le partage des concepts manipulés à la fois par les Métiers et l'IT d'une part, et aussi au sein des Métiers eux-mêmes (homogénéisation des pratiques de la *processabilité* entre les différents ateliers). Le Modèle de Référence nous a enfin permis de commencer à poser les bases de futures solutions pour des problématiques émergentes telles que le calcul dynamique du temps de *process* ou le contrôle avancé des procédés, et d'anticiper d'éventuels besoins futurs (l'appairage). Le Modèle de Référence constitue aujourd'hui le standard à *Crolles300* pour les projets à dimension informatique / métier où il est mis à jour / enrichi avec les nouvelles problématiques remontées.

La Méthodologie par le Modèle de Référence est applicable dans toute autre situation (industrie ou service) présentant les caractéristiques suivantes :

- Une production fortement automatisée avec une importante composante informatique,
- Un contexte complexe soumis à des contraintes évoluant dynamiquement et difficilement prévisibles.

Comme perspectives de nos travaux, il serait intéressant d'analyser l'impact interne des métiers sur la définition de la stratégie IT. En plus de viser un alignement Métier / IT au niveau interne, nous proposons d'étendre la réflexion pour analyser l'impact des métiers sur la définition de la stratégie IT. Bien souvent, la stratégie IT émane de la stratégie Métier. Dans le cadre de nos travaux, vu la forte automatisation, la partie IT devrait être outillée et organisée pour satisfaire les exigences opérationnelles. Ainsi, l'alignement stratégie en IT se ferait par des allers / retours entre les niveaux interne et externe, avec comme point d'ancrage les métiers. À titre d'illustration, la Figure 6.1 traduit un pilotage de la stratégie IT par le niveau Métier interne. En visant dans un premier temps un alignement Métier / IT au niveau interne, nous pourrions par la suite en définir les lignes directrices pour la stratégie IT à mettre en place. Or la stratégie IT influe nécessairement l'IT au niveau interne : il faudra alors, par

itérations, convenir d'un consensus entre les visions stratégique et opérationnelle de l'IT afin de maintenir un alignement vis-à-vis des métiers. A cet effet, il faudra mesurer l'impact de la vision IT opérationnelle sur la stratégie IT.

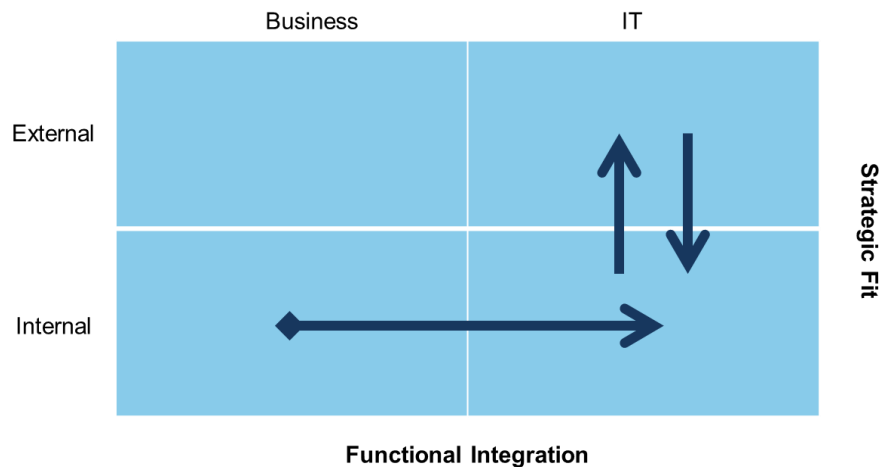


Figure 6.1 : Proposition pour la définition de la stratégie IT

Le consensus joue un rôle déterminant dans la mise en place de l'alignement. Le pendant de cette démarche est de se laisser dériver au gré des compromis. La question qui se pose alors est de définir la limite entre l'intransigeance Métier (pour la prise en compte des besoins des utilisateurs) et les moyens d'y répondre au niveau IT.

Nous pensons que le pilotage de la stratégie IT par le niveau Métier interne permettra de « rationaliser » les décisions du top management pour des choix optimaux. En effet, la prise en compte des pratiques quotidiennes, ancrées dans les organisations, permettra de définir une stratégie « par les pratiques » plus proche de la réalité du terrain tout en traçant une vision claire du futur.

Afin de « démocratiser » davantage le concept d'alignement, il serait intéressant d'arriver à expliquer « comment les choses se font ». En effet, les organisations sont souvent perçues comme des boîtes noires où les pratiques quotidiennes divergent des solutions optimales définies, que ce soit au niveau organisationnel, informatique, ou autre. Parmi les différentes réflexions et pistes de recherches pour l'efficacité des entreprises, la voie de la modélisation nous paraît encore porteuse d'un important potentiel. Pour gagner en visibilité que ce soit pour la compréhension des pratiques opérationnelles que pour le déploiement des nouvelles solutions, la modélisation d'entreprise offre le moyen de conceptualiser et de partager la connaissance autour des concepts introduits. Certes, cette démystification par la modélisation demeure limitée par l'exercice et les appréhensions sur l'effort de modélisation : seule la diffusion d'une culture de modélisation aux différents niveaux hiérarchiques permettrait de s'affranchir de cette difficulté. En outre, la culture de modélisation permettrait, à notre avis, de rapprocher le « top management » des pratiques opérationnelles. L'alignement serait alors plus

facilement atteignable au travers un réseau d'acteurs. Les challenges résident donc à trouver le moyen de diffuser la pratique de modélisation d'entreprise et à construire le réseau d'acteur.

Sur un autre niveau, il serait intéressant également d'appliquer la méthodologie par le Modèle de Référence dans un contexte de service afin de généraliser davantage notre approche. La particularité des industries de services est l'absence d'un outil manufacturier : la frontière Métier / IT est encore plus fine et ces deux domaines sont alors plus intégrés. Le challenge réside alors à arriver à élaborer une vision claire de l'alignement.

Bibliographie

Aloui, S., 2007. *Contribution à la modélisation et l'analyse du risque dans une organisation de santé au moyen d'une approche système*, s.l.: Thèse de Doctorat.

AMICE, 1993. *CIMOSA: Open System Architecture for CIM*. Berlin: Springer Verlag.

Aurum, A. & Wohlin, C., 2005. *Engineering and managing software requirements*. s.l.:Springer.

Avila, O., Goepp, V. & Kiefer, F., 2009. Understanding and classifying information systems alignment approaches. *Journal of computer information systems*, 5(1), pp. 2-14.

Barzi, R., 2007. *Le concept de l'agilité à l'épreuve de la PME*. Montréal, Canada, 16ème Conférence Internationale de Management Stratégique, p. 34.

Baskerville, R., Pries-Heje, J. & Madsen, S., 2011. Post-agility: What follows a decade of agility?. *Information and Software Technology*, 53(5), p. 543–555.

Bergeron, F., Raymond, S. & Rivard, S., 1999. *Conceptualizing and Analyzing Fit in Information Systems Research : An Empirical Comparison of Perspectives*, Montreal: Cahier du GreSI No. 99-03, HEC Montréal.

Bernus, P. & Nemes, L., 1996. A framework to define a generic enterprise reference architecture and methodology. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, Volume 9, pp. 179-191.

Bernus, P., Noran, O. & Molina, A., 2014. *Enterprise Architecture: Twenty Years of the GERAM Framework*. CapTown, The 19th World Congress of the IFAC, pp. 3300-3308.

Bleistein, S. J., Cox, K., Verner, J. & Phalp, K. T., 2006. B-SCP: A requirements analysis framework for validating strategic alignment of organizational IT based on strategy, context, and process. *Information and Software Technology*, 48(9), pp. 846-868.

Bohdana , S., Waldemar , K. & John K. , L., 2007. A review of enterprise agility- Concepts, frameworks, and attributes. *International Journal Of Industrial Ergonomics*, 37(5), pp. 445-460.

Borst, W. N., 1997. *ConstrucBon of Engineering Ontologies*, s.l.: PhD Thesis, University of Twente, Enschede.

Bouchiba, A. & Cherkaoui, A., 2007. *Contribution de la modélisation combinée avec l'approche bayésienne dans l'amélioration des performances des processus métier. Cas de la sûreté ferroviaire au niveau de l'ONCF*. Rabat, Maroc, 5ème Conférence internationale Conception et Production Intégrées CPI.

Bozotti, C. & Bühner , H.-F., 2005. *The European Semiconductor Industry: 2005 Competitiveness Report EECA*, s.l.: European Semiconductor Industry Association.

Camponovo, G. & Pigneur, Y., 2004. *Information Systems alignment in uncertain environments*. Prato, Tuscany, International Conference on Decision Support System DSS'2004: Decision Support in an Uncertain and Complex World.

Canter, J., 2000. *An Agility-Based OODA Model for the e-Commerce/e-Business*. [En ligne] Available at: http://www.belisarius.com/modern_business_strategy/canter/canter.htm

Castano, S. & Antonellis, V. D., 1998. A framework for expressing semantic relationships between multiple information systems for cooperation. *Information Systems*, 23(3), pp. 253-277.

Chang, M. -K., Cheung, W., Cheng, C. -H. & Yeung, J. H. Y., 2008. Understanding ERP system adoption from the user's perspective. *International Journal of Production Economics*, 113(2), pp. 928-942.

Chan, Y. E. & Reich, B. H., 2007. IT alignment: what have we learned?. *Journal of Information Technology*, 22(4), pp. 297-315.

Chapurlat, V., 2007. *Vérification et validation de modèles de systèmes complexe : application à la modélisation d'entreprise*, Université de Montpellier 2: Habilitation à Diriger les Recherches.

Chelli, H., 2003. *Urbaniser l'entreprise et son système d'Information : guide des entreprises agiles*. s.l.:Vuibert.

Chen, D., 2005. *Modélisation d'entreprise pour l'intégration et l'interopérabilité des systèmes industriels*, Université Bordeaux 1: Habilitation à Diriger des Recherches.

Chen, H. -M., Kazman, R. & Garg, A., 2005. BITAM: An engineering-principled method for managing misalignments between business and IT architectures. *Science of Computer Programming*, 57(1), pp. 5-26.

Ciborra, C., 1997. De profundis? Deconstructing the concept of strategic alignment. *Scandinavian Journal of Information Systems*, 9(1), p. 67-82.

Darras, F., 2004. *Proposition d'un Cadre de Référence pour la Conception et l'Exploitation d'un Progiciel de Gestion Intégré*, École des Mines d'Albi-Carmaux: Thèse de doctorat.

Doumeingts, G., Chen, D., Vallespir, B. & Fenie, P., 1993. *GIM (GRAI Integrated Methodology) and its evolutions - A methodology to design and specify advanced manufacturing systems*. Tokyo, Japon, IFIP WG5.3 workshop on the design of information infrastructure systems for manufacturing (DIISM).

Ferrarini, L. et al., 2006. *Control Architecture for Reconfigurable Manufacturing Systems: the PABADIS'PROMISE approach*. Prague, Czech Republic, IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation ETFA, pp. 545-552.

Fu, M. et al., 2010. *Machine qualification management for a semiconductor back-end facility*. Baltimore, Etats Unis, Proceedings of the Simulation Winter Conference (WSC), pp. 2486-2492.

Ganesan, E. & Paturi, R., 2008. Building Blocks for Enterprise Business Architecture. *SETLabs briefings*, 6(4), pp. 3-14.

Guizani, T. & Ladet, P., 2010. Modélisation de l' « architecture métier » dans le contexte des systèmes hospitaliers : Synthèse des besoins et comparaison de techniques de modélisation. *Ingénierie des systèmes d'information*, 15(5), pp. 115-142.

Henderson, J. C. & Venkatraman, N., 1993. Strategic Alignment: Leveraging Information Technology for Transforming Organizations. *IBM Syst. J.*, Volume 32, pp. 4-16.

IDS Scheer AG, 2005. *ARIS Process Platform, enterprise architecture and process platform*, s.l.: white paper.

ITRS, 2011. *ITRS - Executive Summary*, s.l.: International Technology Roadmap for Semiconductors.

Johnzén, C., Dauzère-Perès, S. & Vialletelle, P., 2011. Flexibility measures for qualification management in wafer fabs. *Production Planning and Control*, Volume 22, pp. 81-90.

Jonkers, H. et al., 2006. Enterprise architecture: Management tool and blueprint for the organisation. *Information Systems Frontiers*, 8(2), pp. 63-66.

Kabak, K. E., Heavey, C., Corbett, V. & Byrne, P. J., 2013. Impact of Recipe Restrictions on Photolithography Toolsets in an ASIC Fabrication Environment. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Volume 26, pp. 53-68.

Kaidalova, J. & Seigerroth, U., 2012. An inventory of the business and IT alignment research field. Dans: *Business Information Systems Workshops*. Berlin : Springer Berlin Heidelberg, pp. 116-126.

Kaisler, S. H., Armour, F. & Valivullah, M., 2005. *Enterprise Architecting: Critical Problems*. s.l., Proc. of the 38th HICSS, IEEE CS Press: 224b.

Kearns, G. S. & Lederer, A. L., 2003. A Resource-Based View of Strategic IT Alignment: How Knowledge Sharing Creates Competitive Advantage. *Decision Science*, 34(1), pp. 1-29.

Kennedy, L., 2000. *Come Together, Right Now*. *CIO Magazine*. [En ligne] Available at: <http://www.idg.com.au>

Kiba, J. E., Lamiable, G., Dauzère-Pérès, S. & Yugma, C., 2009. *Simulation of a full 300mm semiconductor manufacturing plant with material handling constraints*. s.l., s.n., p. 1601 – 1609.

Knoll, K. & Jarvenpaa, S. L., 1994. *Information technology alignment or “fit” in highly turbulent environments: the concept of flexibility*. Alexandria, Virginia, United States, The computer personnel research conference on Reinventing IS.

Kosanke, K., 1995. CIMOSA—overview and status. *Computers in Industry*, 27(2), pp. 101-109.

Laudon, K., Laudon, J., Fimbel, E. & Costa, S., 2010. *Management des systèmes d'information*. s.l.:Pearson Education France.

Le Moigne, J.-L., 1977. *La théorie du système général: théorie de la modélisation*. 3ème édition, 1990 éd. s.l.:Presses Universitaires de France.

Lederer, A. & Mendelow, A., 1989. Co-ordination of Information Systems Plans with Business Plans. *Journal of Management Information Systems*, 6(2), p. 5–19.

Leigh Star, S., 2010. Ceci n'est pas un objet-frontière!. *Revue d'anthropologie des connaissances*, 4(1), pp. 18-35.

Leigh Star, S. & Griesemer, J. R., 1989. Institutional ecology, translations' and boundary objects: Amateurs and professionals in Berkeley's Museum of Vertebrate Zoology. *Social studies of science*, 19(3), pp. 387-420.

Longépé, C., 2004. *Le projet d'urbanisation du SI - Démarche pratique avec cas concrets*. s.l.:Dunod, Paris.

Luftman, J., 2004. Assessing business-IT alignment maturity. Dans: I. Global, éd. *Strategies for information technology governance*. s.l.:s.n.

Luftman, J. N., 1996. *Competing in the information age: Strategic alignment in practice*. s.l.:Oxford University Press, New York.

Mamoghli, S., Goepp, V. & Botta-Genoulaz, V., 2015. An operational “Risk Factor Driven” approach for the mitigation and monitoring of the “Misalignment Risk” in Enterprise Resource Planning projects. *Computers in Industry*, 70(doi:10.1016/j.compind.2015.01.010), pp. 1-12.

Martensson, A., 2007. *Producing and Consuming Agility*. ISBN 10: 0-7506-8235-3, 2007. pp. 41-51 éd. Burlington, USA,: Desouza K. C. editor, Agile Information Systems: Conceptualization, Construction, and Management..

Martin, R. A., Robertson, E. L. & Springer, J. A., 2004. *Architectural Principles for Enterprise Frameworks*. s.l., CAiSE Workshops (1), pp. 151-162.

Mili, A., Bassetto, S., Siadat, A. & Tollenaere, M., 2009. Dynamic risk management unveils productivity improvements. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(1), pp. 25-34.

Mönch, L. et al., 2011. A survey of problems, solution techniques, and future challenges in scheduling semiconductor manufacturing operations. *Journal of Scheduling*, Volume 14, pp. 583-599.

Morley, C., 2002. La modélisation des processus : typologie et proposition utilisant UML. *Processus & Systèmes d'information - Assises ADELI*.

Morley, C., Hugues, J., Leblanc, B. & Hugues, O., 2005. *Processus Métiers et systèmes d'information: Evaluation, modélisation, mise en oeuvre*. s.l.:Dunod.

Moyne, J., Del Castillo, E. & Hurwitz, A. M., 2010. *Run-to-run control in semiconductor manufacturing*. s.l.:CRC Press.

Nduhura Munga, J., Dauzère-Pérès, S., Vialletelle, P. & Yugma, C., 2011. *Dynamic management of controls in semiconductor manufacturing*. s.l., Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC), pp. 1-6.

Nduhura Munga, J., Dauzère-Pérès, S., Vialletelle, P. & Yugma, C., 2012. *Industrial implementation of a dynamic sampling algorithm in semiconductor manufacturing: Approach and challenges*. s.l., Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC), pp. 1-19.

Panetto, H., 2006. *Meta-modèles et modèles pour l'intégration et l'interopérabilité des applications d'entreprises de production*, Université Henri Poincaré: Habilitation à Diriger des Recherches.

Papazoglou, M. P. & Heuvel, W., 2000. Configurable Business Objects for Building Evolving Enterprise Models and Applications. Dans: Berlin: J.D. W.M.P. van der Aalst, & A. Oberweis (Ed.), pp. 328-344.

Papp, R., 2001. *Strategic Information Technology: Opportunities for Competitive Advantage*. s.l.:IDEA Publishing Group, Hershey.

Pereira, C. M. & Sousa, P., 2005. *Enterprise architecture: business and IT alignment*. s.l., Proc. of the 2005 ACM symposium on Applied computing, 1344-1345..

Petty, C. & van der Meulen, R., 2009. *Gartner, Inc.*. [En ligne] Available at: <http://www.gartner.com/newsroom/id/1159617> [Accès le 02 06 2015].

Porter, M., 1987. *From competitive advantage to corporate strategy*. s.l.:Harvard Business Review.

Potts, C., 1997. *Fitness for Use: The System Quality that Matters Most*. Barcelona, Spain, REFSQ'97: Third Int.Workshop on Requirements Engineering: Foundation for Software Quality.

Qumer, A. & Henderson-Sellers, B., 2008. An evaluation of the degree of agility in six agile methods and its applicability for method engineering. *Information and Software Technology*, 50(4), pp. 280-295.

Redoli, J., Mompó, R., García-Díez, J. & López-Coronado, M., 2008. A model for the assessment and development of Internet-based information and communication services in small and medium enterprises. *Technovation*, 28(7), pp. 424-435.

Reix, R. & Rowe, F., 2002. *Faire de la recherche en systèmes d'information*. s.l.:Paris: Editions Vuibert.

Renner, R. A., Latimore, D. & Wong, D., 2003. *Business and IT operational models in financial services: Beyond strategic alignment*, <https://www-935.ibm.com/services/nz/igs/pdf/g510-3267-business-and-it-operational-models-financial-services.pdf>: IBM Institute for Business Value study.

Roboam, M., 1993. *La méthode Grai: principes, outils, démarche et pratique*. s.l.:Teknea.

Roux, A., 2004. Système d'information et dispositif informationnel: quelle articulation?. *Sciences de la société*, Issue 63, pp. 26--39.

Rowshannahad, M., Dauzère-Pérès, S. & Cassini, B., 2015. Capacitated qualification management in semiconductor manufacturing. *Omega*, Volume 54, pp. 50-59.

Sahnoun, M. H., Bettayeb, B., Bassetto, S. J. & Tollenaere, M., 2014. Simulation-based optimization of sampling plans to reduce inspections while mastering the risk exposure in semiconductor manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1(15), pp. doi:10.1007/s10845-014-0956-x.

Salinesi, C. & Rolland, C., 2003. *Fitting Business Models to Systems Functionality Exploring the Fitness Relationship*. Velden, Austria, CAiSE'03.

Salinesi, C. & Thevenet, L.-H., 2008. Enterprise Architecture: des problèmes pratiques à l'innovation. *Ingénierie des Systèmes d'Information*, pp. 75-105.

Scheer, A.-W., 2002. *ARIS: des processus de gestion au système intégré d'applications*. s.l.:Springer Science & Business Media.

Scheer, A. W. & Nüttgens, M., 2000. *ARIS Architecture and Reference Models for Business Process Management*. Berlin: J.D. W.M.P. van der Aalst, & A. Oberweis.

Schekkerman, J., 2003. *How to Survive in the Jungle of Enterprise Architecture Framework: Creating or Choosing an Enterprise Architecture Framework*. s.l.:Trafford.

Scott-Morton, M., 1991. *The Corporation of the 1990s: Information Technology and Organizational Transformation*. New York: Oxford University Press.

Sessions, R., 2007. *Comparison of the top four enterprise architecture methodologies*. [En ligne] Available at: <http://goo.gl/c8IBUa>

Shahzad, M. K., Tollenaere, M., Hubac, S. & Siadat, A., 2012. *Extension des méthodes DFM pour l'industrialisation de produits microélectroniques*. Saint-Sauveur, Montréal, Canada, 9ème Congrès International de Génie Industriel.

Silvius, A. G., 2009. *Business and IT Alignment: What We Know and What We Don't Know*. s.l., ICIME'09, 558-563.

Silvius, A. G., De Waal, B. M. & Smit, J., 2009. *Business and IT Alignment; Answers and Remaining Questions*. s.l., Proc. of the PACIS, paper 44..

Tardieu, H., Rochfeld, A. & Colletti, R., 1984. *La méthode MERISE : Principes et outils*. s.l.:Editions de l'Organisation.

The Open Group, 2009. *The Open Group Architectural Framework (TOGAF)*. Version 9 éd. s.l.:s.n.

Theroude, F., Braesch, C. & Haurat, A., 2001. *OLYMPIOS: un modèle pour le pilotage de processus*. Troyes, France, MOSIM'01 : Conférence Francophone de Modélisation et Simulation, pp. 249-253.

Urba-EA, C., 2006. *Urbanisme des SI & gouvernance*. s.l.:Dunod.

Urba-SI, C., 2003. *Pratique de l'urbanisme des systèmes d'information en entreprises*. s.l.:Publibook.

Uschold, M. & Gruninger, M., 1996. Ontologies: Principles, Methods and Applications. *Knowledge Engineering Review*, 11(2), pp. 93-136.

Vallespir, B., 2003. *Modélisation d'entreprise et architectures de conduite des systèmes de production*, Université Bordeaux 1: Habilitation à Diriger des Recherches.

Vallespir, B., Doumeingts, G. & Zanettin, M., 1989. *Proposals for an integrated approach to model and design manufacturing systems: the GRAI Integrated Method*. Tokyo - Japan, 3rd International conference on computer applications in production and engineering (CAPE).

Vallespir, B., Merle, C. & Doumeingts, G., 1993. GIM: a technico-economic methodology to design manufacturing systems. *Control Engineering Practice*, 1(6), pp. 1031-1038.

Venkatraman, N., 1991. IT-induced business reconfiguration. *The Corporation of the 1990s. Information Technology and Organizational Transformation*. Oxford University Press, New York, pp. 122-158.

Vernadat, F., 1996. *Enterprise modeling and integration: principles and applications*. s.l.:London: Chapman & Hall London.

Vernadat, F., 2006. *Interoperable enterprise systems: architectures and methods*. Saint Etienne, France, 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, pp. 13-20.

Wang, X., Zhou, X. & Jiang, L., 2008. *A method of business and IT alignment based on enterprise architecture*. Beijing, IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics, pp. 740-745.

Wegmann, A. et al., 2002. *Business and IT Alignment with SEAM for Enterprise Architecture*. s.l., Proc. of the 11th IEEE International - EDOC, 111-121..

Wegmann, A., Regev, R. & Loison, B., 2005. *Business and IT Alignment with SEAM*. Paris, France, REBNITA Requirements Engineering for Business Need and IT Alignment.

Weill, P. & Broadbent, M., 1998. *Leveraging the New Infrastructure: How Market Leaders Capitalize on Information Technology*. Massachusetts: Harvard Business School Press.

Whittle, R. & Myrick, C. B., 2004. *Enterprise business architecture: the formal link between strategy and results*. s.l.:CRC Press.

Wieringa, R. J., Blanken, H. M. & Fokkinga, M. M., 2003. *Aligning application architecture to the business context*. Klagenfurt/Velden, Austria, Conference on Advanced Information System Engineering - 209-225.

Yetton, P. W., Johnston, K. D. & Craig, J. F., 1994. Computer-Aided Architects: A Case Study of IT and Strategic Change. *Sloan Management Review*, 35(4), pp. 57-67.

Zachman, J. A., 1987. A framework for information systems architecture. *IBM systems journal*, Volume 26, pp. 276-292.

Zouggar, N., Vallespir, B. & Chen, D., 2006. *Enrichissement de la modélisation d'entreprise par les ontologies*. Rabat - Maroc, 6ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation.

NNT : 2015 EMSE 0793

Ahmed BEN AMIRA

AGILE MODELING FOR A COMPLEX AND DYNAMIC MANUFACTURING SYSTEM

Speciality: Industrial Engineering

Keywords: Semiconductor manufacturing, alignment business / IT, enterprise architecture, modeling of information systems, complex and dynamic system

Abstract:

In a full automation context with a strong Information Technology (IT) component, organizational transformations should always be accompanied by an evolution of the different information systems. In that sense, operational users of the information systems must recognize the use of information systems in terms of their functionality, and their ability to rapidly and continuously answer the requirements of the evolution of the organization.

Having Information Systems (IS) which reflect businesses is not a luxury for companies. The shortfall for the company in the absence of alignment is the impact on the organization performance: The non-adequacy of the IS limits the daily tasks and degrades the potential benefits of full automation. Thus, the production system is conditioned by the IS. Beyond its functional necessity, alignment is also justified by the cost of its implementation compared to a non-alignment.

This thesis aims at ensuring systematic and continuous Business / IT alignment in a complex and dynamic environment.

Our study was led by the specificity of the case study and the literature review. We propose a methodology based on a "Reference Model" to minimize the Business / IT alignment gap. From a functional standpoint, the methodology relies on capturing user requirements in a Reference Model and finding acceptable compromises for the IT development, to reach the alignment incrementally. The methodology is applied on a "processability" case study in semiconductor manufacturing.

NNT : 2015 EMSE 0793

Ahmed BEN AMIRA

MODÉLISATION AGILE POUR UN SYSTEME DE FABRICATION COMPLEXE ET DYNAMIQUE

Spécialité : Génie Industriel

Mots clefs : fabrication de semi-conducteurs, alignement Métier / IT, architecture d'entreprise, modélisation des systèmes d'information, système complexe et dynamique

Résumé :

Dans un contexte d'automatisation totale avec une forte composante informatique, la transformation organisationnelle doit systématiquement être accompagnée d'une évolution des différents systèmes d'information. Dans ce sens, les utilisateurs au quotidien des systèmes d'information doivent « se retrouver » dans l'usage des systèmes d'information au niveau de ses fonctionnalités, et par sa capacité à répondre rapidement, et d'une façon continue, aux demandes d'évolution de l'organisation.

Disposer de Systèmes d'Information (SI) à l'image des métiers n'est pas une vertu ou un luxe que les entreprises cherchent à obtenir. Le manque à gagner pour l'entreprise en l'absence d'alignement se traduit directement sur la performance de l'organisation : la non-adéquation des SI limite les tâches au quotidien et dégrade le potentiel de progrès de l'entière automatisation. Le système de production se trouve ainsi conditionné par les SI. Au-delà de l'aspect fonctionnalité recherché dans l'alignement, sa mise en œuvre se justifie également par le coût de sa mise en place comparé à un non alignement.

Ces travaux visent à garantir, dans un contexte complexe et dynamique, un alignement systématique et continu des SI sur les besoins des processus métiers afin de garantir à l'entreprise les meilleures performances possibles dans l'exploitation de ses SI.

Les spécificités du contexte d'étude ainsi que l'analyse bibliographique de la problématique nous ont menés à proposer une méthodologie basée sur un « Modèle de Référence » afin de combler au mieux le fossé Métier / Technologie de l'Information. Cette méthodologie s'intéresse au niveau fonctionnel en mettant l'accent sur l'expression des besoins afin de mieux distinguer la vision Métier de la vision IT.

Pour valider la méthodologie que nous proposons, nous l'appliquons sur un cas d'étude industriel relatif à l'évolution de l'ensemble des règles d'éligibilité des lots sur les équipements en fabrication de semi-conducteurs, appelées « processabilité ».